

近接性からみたネットワーク形態解析と
輸送システム最適化に関する数理的研究

システム情報工学研究科

筑波大学

2006年3月

渡 部 大 輔

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究の背景と目的	1
1.1.1	道路網の形成	2
1.1.2	輸送システムの形成	2
1.1.3	研究の目的	4
1.2	既存研究の整理	5
1.2.1	点間の近接性によって構築されるグラフの性質	5
1.2.2	交通網の形態解析	6
1.2.3	移動から見た交通網の評価	7
1.2.4	輸送システムにおける階層構造の最適化	10
1.3	研究の構成	14
第2章	点間の近接性によって構築されるグラフの性質	17
2.1	はじめに	17
2.2	近接性によって構築されるグラフ	18
2.2.1	グラフの定義	18
2.2.2	近接グラフ及びそれに関連したグラフの定義	18
2.3	近接グラフ及びそれに関連したグラフの構築辺に関する形態的性質	21
2.3.1	ランダム点分布におけるグラフの辺の長さ	21
2.3.2	規則的格子との比較	26
2.4	グラフ上の移動距離	29
2.4.1	移動距離の算出	29
2.4.2	移動距離による比較	30
2.4.3	直線距離との比による比較	33
2.4.4	総延長と総移動距離の関係	36
2.5	まとめ	38

目 次

第 3 章	交差点間の近接性に着目した都市内道路網形態の解析	39
3.1	はじめに	39
3.2	研究の方法	41
3.2.1	近接性に関するグラフ	41
3.2.2	道路網の形態指標	42
3.2.3	使用する地図データ	45
3.3	形態指標による道路網形態の評価	48
3.3.1	格子状道路網	48
3.3.2	都市内道路網	50
3.3.3	形態指標 GTP と CF の関係分析	51
3.4	近接性に関するグラフによる都市内道路網の分析	52
3.4.1	近接グラフと最小木の構築	52
3.4.2	近接性による道路辺の構築原理の把握	56
3.4.3	各種構成比率による比較	59
3.4.4	構成比率による全国都市間比較	60
3.4.5	道路構成比率と形態指標による比較	67
3.5	米道路網での分析	71
3.5.1	使用する地図データ	71
3.5.2	形態指標 CF と GTP の関係分析	73
3.5.3	道路構成比率と形態指標による比較	73
3.6	まとめ	80
第 4 章	移動時間と交通量からみた最適な格子状道路網の形態	83
4.1	はじめに	83
4.2	モデルの概要と交通サービス水準の導出	84
4.2.1	モデルの概要	84
4.2.2	最大通行量	85
4.2.3	平均移動時間	87
4.3	交通サービス水準による最適な格子状ネットワーク形態	88
4.3.1	平均移動時間を最小にするネットワーク形態	88
4.3.2	最大通行量を最小にするネットワーク形態	91
4.4	混雑現象を考慮した場合	95
4.4.1	混雑を考慮した平均移動時間	96
4.4.2	混雑を考慮した平均移動時間を最小にするネットワーク形態	96

4.5	まとめ	100
第5章	輸送システムにおける最適な中継施設の階層構造	101
5.1	はじめに	101
5.2	モデルの概要と輸送費用の定式化	104
5.2.1	モデルの概要	104
5.2.2	領域形状や集配経路による輸送費用	106
5.2.3	総輸送費用の一般化	109
5.3	輸送費用最小化による最適な階層構造の導出	111
5.3.1	輸送量における規模の経済性が存在しない場合	111
5.3.2	規模の経済性について一定の関係がある場合	111
5.3.3	規模の経済性について一般的な関係の場合	114
5.3.4	最適な階層数・施設数と対数分岐比の算出	118
5.4	輸送システムにおける最適な階層構造の特性	121
5.4.1	規模の経済性による最適な階層数	121
5.4.2	規模の経済性による最適な第 m 階層施設数	123
5.4.3	需要密度による最適な階層構造	125
5.5	施設費用を考慮した場合の階層構造の変化	127
5.5.1	総費用の定式化	127
5.5.2	規模の経済性について一定の関係がある場合	128
5.5.3	規模の経済性について一般的な関係がある場合	130
5.5.4	施設費用係数による最適な階層システムの特性	131
5.6	巡回型輸送における最適輸送システムの導出	135
5.6.1	巡回移動を考慮した輸送費用の定式化	136
5.6.2	巡回型輸送における最適な階層数と施設数の算出	137
5.6.3	巡回型輸送における最適な階層構造の特性	138
5.7	現実の輸送における階層構造の考察	141
5.7.1	対象とする各国の概要	141
5.7.2	需要量・施設数のデータ	142
5.7.3	輸送費用の推定	143
5.7.4	階層数と施設数に関する国際間比較	144
5.8	まとめ	147

目 次

第 6 章	おわりに	149
6.1	本研究の結論	150
6.2	今後の課題と展望	153
参考文献		155
謝辞		167
付 録 A	都市内道路網に関する地理情報データ	169
A.1	日本主要都市	169
A.1.1	道路網データの作成	169
A.1.2	道路網と構築原理	171
A.2	米国主要都市	182
A.2.1	道路網データの作成	182
A.2.2	道路網と構築原理	182

目 次

図 1.1	道路延長の推移	3
図 1.2	高速道路延長の推移	3
図 1.3	物流機能別売上高物流コストの推移	3
図 1.4	サービス提供方法と移動規則による階層的施設の分類	12
図 1.5	本論文の構成	15
図 2.1	各近接グラフの構築法に基づく探索領域	19
図 2.2	近接グラフの構築例（一様にランダム点：100 点）	20
図 2.3	探索領域を限定した場合の最近隣距離（相対近傍グラフ）	23
図 2.4	探索領域を限定した場合の最近隣距離（最小木）	25
図 2.5	近接性に関するグラフの辺長分布	26
図 2.6	各規則的点分布における近接グラフ	27
図 2.7	規則的格子とランダム点における各グラフの平均辺長	27
図 2.8	移動距離の計測方法	29
図 2.9	移動距離分布（相対近傍グラフ RNG）	32
図 2.10	移動距離分布（ガブリエルグラフ GG）	32
図 2.11	移動距離分布（ドローネ網 DT）	32
図 2.12	直線距離との比の分布（相対近傍グラフ RNG）	35
図 2.13	直線距離との比の分布（ガブリエルグラフ GG）	35
図 2.14	直線距離との比の分布（ドローネ網 DT）	35
図 2.15	近接グラフの総延長と総移動距離	37
図 3.1	模式的交通網	43
図 3.2	ランダムな直線（100 本）	43
図 3.3	道路辺とグラフ辺による構成比率	45
図 3.4	対象地区	46
図 3.5	各規則的点分布における近接グラフ	48
図 3.6	GTP 値による対象都市の点数と辺数の関係	50

図目次

図 3.7	CF 値による対象都市の点数と道路長の関係	50
図 3.8	各形態指標によるグラフと道路網の比較	51
図 3.9	各形態指標によるグラフと道路網の比較 (拡大)	51
図 3.10	道路網 (つくばセンター地区)	53
図 3.11	道路網と道路辺 (つくばセンター地区)	53
図 3.12	道路点の抽出 (つくばセンター地区)	53
図 3.13	道路点より生成した近接グラフと最小木	54
図 3.14	近接グラフと道路辺の辺長分布 (つくばセンター地区)	55
図 3.15	近接グラフと道路辺の次数分布 (つくばセンター地区)	55
図 3.16	近接性に関するグラフと道路辺の比較	57
図 3.17	道路辺ごとのグラフ辺との重ね合わせ	58
図 3.18	構成比率 (つくばセンター地区)	59
図 3.19	道路構成比率 RR	61
図 3.20	グラフ構成比率 GR	61
図 3.21	総合構成比率 ER	61
図 3.22	道路構成比率 RR と GTP の比較	68
図 3.23	道路構成比率 RR と CF の比較	69
図 3.24	相対近傍グラフと道路辺の比較	70
図 3.25	対象地区 (米国)	72
図 3.26	各形態指標によるグラフと道路網の比較 (米国都市)	73
図 3.27	各形態指標によるグラフと道路網の比較 (米国都市・拡大)	73
図 3.28	道路構成比率 RR と GTP の比較 (米国都市)	77
図 3.29	道路構成比率 RR と CF の比較 (米国都市)	78
図 3.30	相対近傍グラフと道路網 (米国都市)	79
図 4.1	領域と移動の概要	84
図 4.2	ゾーン間移動の概要	85
図 4.3	ゾーン内移動	85
図 4.4	$(i, j)(i + 1, j)$ 間のリンクを通行する OD ペア	86
図 4.5	正方格子状ネットワークの概要	89
図 4.6	ネットワーク本数比率 M による平均移動時間 T の変化	89
図 4.7	領域形状比率 N による平均移動時間 T_{SG} の変化	90
図 4.8	領域形状比率 N による平均移動時間 T_{SG} を一定とするネットワーク長 W の変化	90

図 4.9 相似格子状ネットワークの概要	92
図 4.10 ネットワーク本数比率 M による最大通行量 q^+ の変化	92
図 4.11 領域形状比率 N による最大通行量 q_{RG}^+ の変化	94
図 4.12 領域形状比率 N による最大通行量 q_{RG}^+ を一定とするネットワーク長 W の変化	94
図 4.13 通行量 q と速度 v の関係	95
図 4.14 ネットワーク本数比率 M による平均移動時間 T^C の変化 (混雑)	97
図 4.15 領域形状比率 N による平均移動時間 T^C を最小にするネットワーク本数比率 M の変化 (混雑)	98
図 4.16 領域形状比率 N による平均移動時間 T_{RG}^C の変化 (混雑)	99
図 4.17 領域形状比率 N による平均移動時間 T_{RG}^C を一定にするネットワーク長 W の変化 (混雑)	99
図 5.1 階層的輸送	101
図 5.2 郵便輸送における階層的輸送の概要	102
図 5.3 一般路線貨物自動車運送事業運賃料金	102
図 5.4 多階層輸送モデル	104
図 5.5 輸送量・輸送距離と輸送費用の関係	105
図 5.6 一次元都市での収集輸送の概要	107
図 5.7 一次元都市での第 m 階層での収集輸送の概要	107
図 5.8 二次元都市での第 m 階層での収集輸送の概要 ($k=6$)	108
図 5.9 m 階層の中心への輸送の概要 ($k=6$)	108
図 5.10 第 m 階層の中心への輸送の概要 (円形都市)	109
図 5.11 第 m 階層の中心への輸送の概要 (直交距離)	109
図 5.12 階層数 M と総輸送費用 C_t^\dagger の関係 ($a=b$)	114
図 5.13 階層数 M による総輸送費用 C_t^\dagger	118
図 5.14 規模の経済性 α, β による最適階層数 M^* (一次元 SS)	122
図 5.15 規模の経済性 α, β による最適階層数 M^* の等高線 (一次元 SS)	122
図 5.16 規模の経済性 α, β による最適階層数 M^* (二次元 SS)	122
図 5.17 規模の経済性 α, β による最適階層数 M^* の等高線 (二次元 SS)	122
図 5.18 次元による最適階層数 M^*	123
図 5.19 輸送量弾性値 α による最適施設数 $n_m^*(\beta=1)$	124
図 5.20 輸送距離弾性値 β による最適施設数 $n_m^*(\alpha=0)$	124
図 5.21 需要量 n_0 による規模の経済性 α, β と最適階層数 M^* の関係	125
図 5.22 需要量 n_0 による第 m 階層施設数	126

図目次

図 5.23 総輸送費用と総施設費用による総費用最適化 ($a = b$)	130
図 5.24 総輸送費用と総施設費用による総費用最適化 ($a \neq b$)	131
図 5.25 施設費用係数 F と輸送距離弾性値 β による最適階層数 M^*	132
図 5.26 施設費用係数 F と輸送距離弾性値 β による最適階層数 M^* の等高線	132
図 5.27 施設費用 F による最適階層数 M^*	133
図 5.28 輸送距離弾性値 β による最適階層数	133
図 5.29 施設費用係数 F による対数分岐比 r と最適階層数 $M^*(\beta = 1)$	134
図 5.30 輸送機材の経路選択方法	135
図 5.31 二次元都市での第 m 階層での収集輸送の概要 (Multi-Stop 型)	136
図 5.32 規模の経済性 α, β による最適階層数 M^* (二次元 MS)	139
図 5.33 規模の経済性 α, β による最適階層数 M^* の等高線 (二次元 MS)	139
図 5.34 規模の経済性 α, β と最適階層数 M^* の関係 (二次元 SS・MS)	139
図 5.35 規模の経済性 α, β と各指標の関係	139
図 5.36 各国小包輸送における需要量と第 m 階層施設数	143
図 5.37 規模の経済性に関するパラメータ	144
図 5.38 小包輸送での第 m 階層施設数 (アメリカ)	146
図 5.39 小包輸送での第 m 階層施設数 (ドイツ)	146
図 5.40 小包輸送での第 m 階層施設数 (日本)	146
図 5.41 小包輸送での第 m 階層施設数 (オランダ)	146
図 A.1 図郭による道路網分断例 (数値地図 2500)	169
図 A.2 道路網 (つくばセンター)	171
図 A.3 道路網 (東京・東京駅)	171
図 A.4 道路網 (東京・上野駅)	172
図 A.5 道路網 (東京・新宿駅)	172
図 A.6 道路網 (東京・渋谷駅)	173
図 A.7 道路網 (東京・池袋駅)	173
図 A.8 道路網 (札幌)	174
図 A.9 道路網 (仙台)	174
図 A.10 道路網 (さいたま)	175
図 A.11 道路網 (千葉)	175
図 A.12 道路網 (横浜)	176
図 A.13 道路網 (川崎)	176
図 A.14 道路網 (静岡)	177

図目次

図 A.15 道路網 (名古屋)	177
図 A.16 道路網 (京都・上京)	178
図 A.17 道路網 (京都・下京)	178
図 A.18 道路網 (大阪・中之島)	179
図 A.19 道路網 (大阪・難波)	179
図 A.20 道路網 (神戸)	180
図 A.21 道路網 (広島)	180
図 A.22 道路網 (北九州)	181
図 A.23 道路網 (福岡)	181
図 A.24 道路網 (New York)	182
図 A.25 道路網 (Washington D.C.)	183
図 A.26 道路網 (Chicago)	183
図 A.27 道路網 (Minneapolis)	184
図 A.28 道路網 (New Orleans)	184
図 A.29 道路網 (Dallas)	185
図 A.30 道路網 (Denver)	185
図 A.31 道路網 (Portland)	186
図 A.32 道路網 (San Francisco)	186
図 A.33 道路網 (San Diego)	187

目 次

表 1.1	施設配置問題の分類	11
表 1.2	対象とする空間と距離によるモデルの分類	15
表 2.1	規則的格子における各グラフの辺の総本数	28
表 2.2	規則的格子における各グラフ辺の総延長	28
表 2.3	規則的格子とランダム点における各グラフの平均辺長	28
表 2.4	移動距離の平均	33
表 2.5	直線距離との比	36
表 3.1	整備水準と配置パターン	40
表 3.2	街路パターンの分類	40
表 3.3	模式的交通網における各指標	43
表 3.4	対象地区の道路網データ	47
表 3.5	各規則的点分布におけるグラフの総辺数 m	49
表 3.6	各規則的点分布におけるグラフの総辺長 L	49
表 3.7	各規則的点分布におけるグラフの GTP	49
表 3.8	各規則的点分布におけるグラフの CF	49
表 3.9	近接グラフと最小木の構築辺の総本数	62
表 3.10	近接グラフと最小木の構築辺の総延長	63
表 3.11	各地区の道路構成比率 RR	64
表 3.12	各地区のグラフ構成比率 GR	65
表 3.13	各地区の総合構成比率 RR	66
表 3.14	対象地区の道路網データ (米国)	71
表 3.15	近接グラフと最小木の構築辺の総本数 (米国都市)	74
表 3.16	近接グラフと最小木の構築辺の総延長 (米国都市)	74
表 3.17	各地区の道路構成比率 RR (米国都市)	75
表 3.18	各地区のグラフ構成比率 GR (米国都市)	75
表 3.19	各地区の総合構成比率 ER (米国都市)	75

表 目 次

表 5.1	各指標による最適階層数 M^*	106
表 5.2	パラメータの置換	110
表 5.3	領域次元による対数分岐比 r	120
表 5.4	輸送量弾性値 α による対数分岐比 r と最適階層数 $M^*(\beta = 1)$	124
表 5.5	輸送距離弾性値 β による対数分岐比 r と $M^*(\alpha = 0)$	124
表 5.6	施設費用の考慮有無による最適な輸送システム	131
表 5.7	施設費用係数 F による対数分岐比 r と最適階層数 $M^*(\beta = 1)$	134
表 5.8	パラメータの置換（巡回移動）	137
表 5.9	領域次元による対数分岐比 r （巡回移動）	138
表 5.10	各指標による最適階層数 M^*	140
表 5.11	各国の概要（1996 年）	141
表 5.12	各国小包輸送におけるデータの出典	142
表 5.13	各国小包輸送における需要量と第 m 階層施設数	142
表 5.14	規模の経済性に関するパラメータ推定結果	144
表 5.15	各階層輸送での対数分岐比 r （小包輸送）	145
表 5.16	各国小包輸送における最適階層数 M^*	145
表 A.1	対象地区の道路網の対象図葉（数値地図 2500）	170

第1章 はじめに

1.1 研究の背景と目的

太古の昔より、距離を隔てた場所にある物資や情報などの交換を通じて、交流の場である都市が発展を続けてきた。そして現在に至るまで、交通に関する技術も発展を遂げ、陸・海・空を分け隔てることなく移動することが可能となった。

具体的には、様々な交通具（馬車、自動車、鉄道、船舶、飛行機）が発明され、都市間を結ぶ交通路（道路、鉄路、水路、海路、空路）が形成された。これらの交通路は結節点（交差点、駅、港、空港）にて相互間で連結され、交通網（ネットワーク）が世界中にはりめぐらされている。このように交通網の発展により、社会・経済・文化的な交流を拡大することが可能となり、今日の人類の繁栄の礎となったことは明らかである。

交通網は、地形や歴史などの固有の条件の下で、国土や都市の骨組として長年の様々なアクティビティの積み重ねによって形成されてきた。本研究では、こうした交通網がいかなる論理で結ばれるかを「構築原理」と呼ぶこととする。原始の頃では、距離に対する移動抵抗が高かったため、近い場所を結んでいくことにより、交通網が構築されていったと考えられる。それが、交通に関する技術の発展とともに、距離に対する移動抵抗が小さくなり、距離、時間、費用といった移動にかかるコストを重視し、輸送システム全体の最適化を考慮した交通網が構築されるようになったと考えられる。このように交通網の構築原理は、移動できる空間が広がるとともに、局所的観点から見た近接性から全体的観点から見た最適性へと変化し、その交通網を利用する輸送システムにも大きな変化を与えられられる。

本研究では、交通網を「点」と「線」で構成されている「グラフ」として模式的に扱う。「点」は、移動の需要が発生したり目的地となるアクティビティの起終点や、交通路が相互に連結している交通結節点などを表す。「線」は、移動需要を満たすために移動主体である人や交通具が行きかう点間を結ぶネットワークを表す。

以下、わが国における道路網と輸送システムの現状から、本研究における問題点を明確にする。

第1章 はじめに

1.1.1 道路網の形成

わが国における道路は、道路法第三条により「高速自動車国道，一般国道，都道府県道，市町村道」と分類される．それぞれの整備距離の推移は、図 1.1 のようになる（[国土交通省（2004）]）．道路総延長は年々増加しており，特に高速道路のような幹線道路の整備が急速に進んでいる．しかし，市町村道が総道路延長の約 85%と大部分を占めており，そのほとんどは都市内の区画道路のような機能分類としては低い道路である．

都市内での代表的な道路網形態として，都市計画では主に欧米都市や理想都市に見られる格子状などの規則的道路網形態が紹介されている．日本の都市では，京都や札幌などの計画都市や区画整理などによる計画市街地においては格子状道路網が見られるものの，多くの非計画市街地では規則的道路網形態を有していない．

一方，都市内移動を扱った数理モデルでは，距離分布や流動量分布の観点から移動の利便性について議論されているが，移動経路選択において理論的な距離で連続的に移動できることが想定されている．特に，直交距離のような格子状道路網が一様に整備されていることが仮定されている場合が多い．しかし，現実の都市に対して規則的道路網を想定した数理モデルを用いる際，現実の道路がどの程度規則的であるのかが明らかでなければならない．そこで，現実の複雑な道路網に対して，近接性に基づく構築原理から規則的道路網と比較を行う必要がある．

そして，都市間を結ぶ幹線道路に着目すると，特に高速道路の整備距離について特に見てみると，図 1.2 のように急激な増加が見られる．1956 年，名神高速道路建設の調査のため来日したラルフ・J・ワトキンスは，その報告書の中で「日本の道路は信じがたいほど悪い．工業国にしてこれほど完全にその道路網を無視してきた国は日本の他にない．」と指摘している．その後，1963 年の名神高速道路の開通に始まり，戦後の経済成長とともに現在までに約 7000km 程度の整備が進んでいる．

こうした高速で移動できる道路網の整備において，整備延長によって利便性が評価されている場合が多い．しかし，日本のような国土形状が細長い領域では，同じ長さを整備しても交通網形態の違いによって，交通サービス水準が大きく異なると考えられる．そのため，領域形状や交通サービス水準の違いによって，最適な交通網形態を考察する必要がある．

1.1.2 輸送システムの形成

道路上を移動する自動車などの移動距離削減が実現することによる影響は，温室効果ガス排出量の削減とともに，移動時間減少による利便性向上，輸送コストの削減など多方面に及ぶ．このように交通・輸送システムは，道路網といったインフラの形態に大きく影響を受けている．

道路網などの交通インフラを利用した輸送システムとして，物流が挙げられる．物流とは「物的流通」の略であり，「輸送・保管・包装・荷役・流通加工及びそれらに関連する情報の諸

1.1. 研究の背景と目的

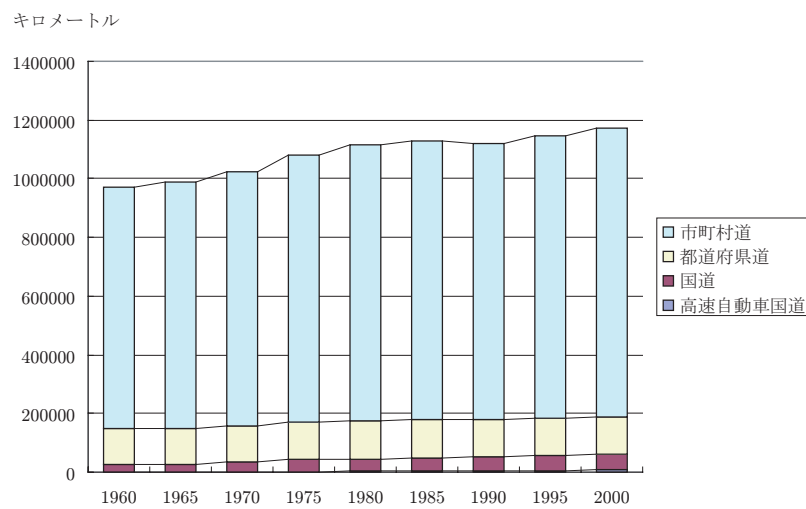


図 1.1: 道路延長の推移

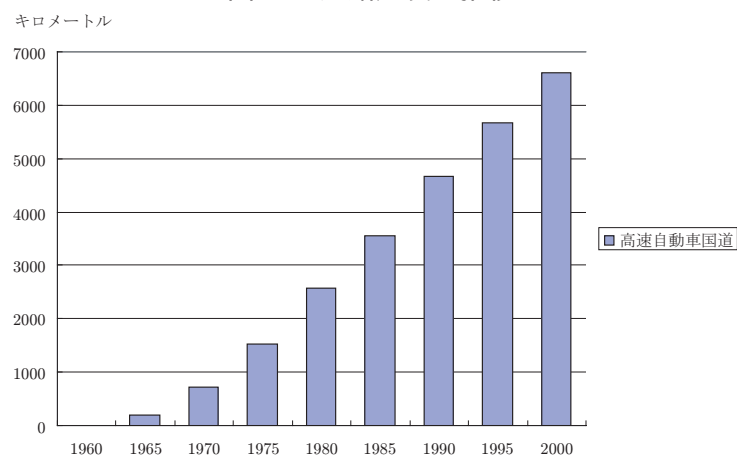


図 1.2: 高速道路延長の推移

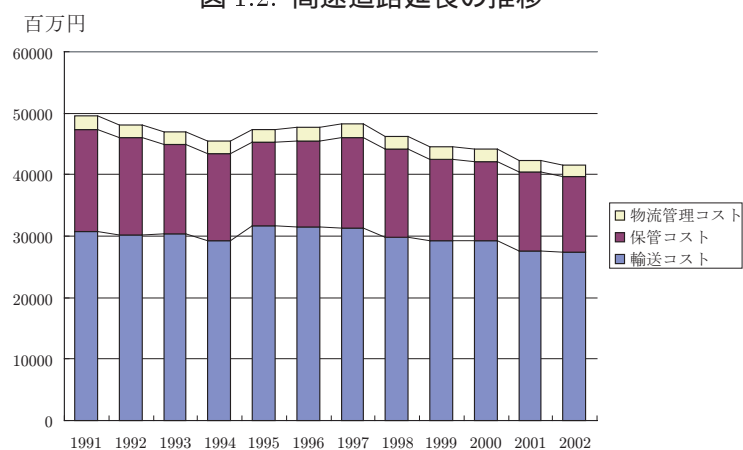


図 1.3: 物流機能別売上高物流コストの推移

第1章 はじめに

機能を総合的に管理する活動」(日本工業規格 JIS Z011)と定義されている。図 1.3 では、物流機能別に物流費用の推移を示している(出典:[日本ロジスティクス協会(2005)])。総物流費用は対 GDP 比で 8%(2002 年)を占めており、さらに輸送費用の占める割合が約 65%程度と最も高い。総物流費用とともに同様に輸送費用も年々減少を続けている。

また近年では、地球環境問題への関心の高まりから CO₂ など温室効果ガスの削減が目標とされている。そのため、環境負荷を低減させる輸送システムの構築を目指し、[中村, 林, 宮本(2004)]のような交通・輸送による環境負荷に対する研究がなされ、政府も様々な政策を実施している。例えば、貨物輸送において、広域的にはモーダルシフトなど鉄道や船舶を利用した複合一貫輸送への取り組みや都市内では地区内共同集配送が進められている。また、旅客輸送においても、パークアンドライドなど公共交通の利用を促進するような取り組みが見られる。このように、複数の輸送機関の利用も含めて、中継施設を利用した積替による階層的輸送が構築されている。

このように物流は、環境や経済など社会に与える影響も大きく、物流を想定した階層的輸送システムの分析に意義があると考えられる。

1.1.3 研究の目的

これまで見てきたように、望ましい交通網の形態は、空間スケールによって大きく異なると考えられる。都市内交通では、地形による影響はそれほど小さくなく、道路網は街割として大きく変化することは少なく、比較的近距离交通も多く見られるので、局所的な観点から見た近接性が重要となる。都市間交通では、長距離交通も含まれるため、近接性だけではなく、全体的な観点から見た最適性が重要となる。

こうして、交通網形態と移動需要の相互作用により現状の大規模かつ複雑な交通網が構築されてきた過程を近接性と最適性という構築原理から把握する。本研究の目的は、大きく分けて 2 つある。前半では、局所的観点に見た近接性を構築原理として、近接グラフと道路網の形態について考察する。まず、点間の近接性によって構築されるグラフの形態的性質を明らかにし、ネットワーク形態と移動利便性から規則的道路網との比較を行う。そして、都市内道路網について近接グラフにより形態解析を行い、実際の都市に見られる複雑な道路網の構築原理を明らかにすることを目的とする。

後半では、全体的観点から見た最適性を構築原理として、道路網と輸送システムの形態について考察する。まず、都市空間における交通施設に関して、線的施設(道路・鉄道などのネットワーク)として格子状道路網における最適な高速交通ネットワークの形態に導出する。そして、点的施設(交差点・倉庫・駅などの輸送中継施設)として、輸送システムにおける最適な階層構造を導出することを目的とする。

1.2 既存研究の整理

都市空間における交通・輸送に関する分析は、都市・地域計画学、土木計画学、交通工学、都市経済学、計量地理学、オペレーションズ・リサーチ等の学問領域で様々な数理モデルが提案されている。本研究では、複雑な都市現象に隠された本質的な構造を見出そうというスタンスでモデル分析を行う「都市解析」という学問分野で得られた知見を元に議論を進める。これまで都市解析の分野で基礎とされてきた幾何確率、計算幾何、連続移動モデル等の手法を用いて分析を行う。

そこで本節では、本研究に関係する研究課題について既存研究の整理を行い、これまでの研究で明らかになったことを整理するとともに、課題を抽出し、本研究の位置づけを明確にする。

1.2.1 点間の近接性によって構築されるグラフの性質

近年、[増田, 今野 (2005)] のようにインターネットや人間関係などの形態についてのネットワークモデル分析が精力的に研究が進められている。しかし、これらのモデルでは地理的要因が重きを置かれておらず、交通網の形態解析においては距離の概念が重要になると考えられる。そこで本研究では、点の近さを表す「近接性」によって構築されるグラフに着目する。

[Okabe, Boots, et al. (2000)] では、ドロースネ網などの幾何グラフについて、定義と構築方法を紹介しており、計算幾何、生態学や画像解析など様々な学問領域で得られた知見を統一的にまとめている。その中で紹介されている近接性に関するグラフのうち、代表的なものは下記ののようなグラフがある。各グラフの定義と構築法などの詳細については、第2章で説明する。

1. 孤立最近接対 (Reciprocal Pairs, RP)
2. 最近傍グラフ (Nearest Neighborhood Graph, NNG)
3. 最小木 (Minimum Spanning Tree, MST)
4. 相対近傍グラフ (Relative Neighborhood Graph, RNG)
5. ガブリエルグラフ (Gabriel Graph, GG)
6. ドロースネ網 (Delaunay Triangle, DT)

これらは個々のグラフは関連がありながら、個々の研究に応じた目的や応用分野の違いにより、様々な学問分野で研究されてきた。孤立最近接対と最近傍グラフは、生態学における個体群の隣接関係を記述するために、[Clark, Evans (1954)], [Clark, Evans (1955)] において提案されている。最小木は、最適解を保障した構築法について、主に通信線の配置への応用を目指し、[Kruskal (1956)], [Prim (1957)] において提案されている。相対近傍グラフは、画像解析への応用を目指し、[Toussaint (1980)] において提案されている。ガブリエルグラフは、生態学における個体群の隣接関係を記述するために、[Gabriel, Sokal (1969)] において提案されている。ド

第1章 はじめに

ローネ網は、ポロノイ図の幾何学的性質を明らかにするために、[Delaunay(1928)]において提案されている。

グラフ辺の形態的特性として、辺の長さに着目する。近接グラフについては点間の近接性により辺を構築することができるため、辺の長さの分布は最近隣距離などの幾何確率を用いて導出されている。最近接対は [Pickard(1982)]、最近傍グラフは [Clark, Evans(1954)]、ガブリエルグラフは [Möller(1994)] において導出されている。ドロネ網は、統計力学で [Collins(1968)]、生態学で [Miles(1970)] において独立に導出されている。一方、最小木は近接性だけでなく、全体から見た最適性が必要になるため、[Robert(1968)]、[古山 (1985)]、[Avram, Bertsimas(1992)] において上界値と下界値の推定値が導出されている。また、[古山 (2003)]、[古山 (2005)] において、点の近隣関係によって構築される木と最小木との関係について、辺の長さから比較を行っている。そして、相対近傍グラフと最小木については、辺の長さの分布がまだ導出されていない。

このように、近接性に関係したグラフは、生態学や計算幾何学などで独自に開発されており、交通網に対して、近接性に関する各グラフを用いた形態解析を行うことは意義があると考えられる。

1.2.2 交通網の形態解析

都市計画において、道路網の適正な配置は重要な問題である。[土井, 川上, 他 (1981)] では、空間スケールとともに主に、正方格子、三角格子や放射環状といった幾何学的なパターンを元に、世界の主要都市における道路網パターンを分類している。そして、日本の都市における道路網の整備基準として、[山川 (1980)]、[都市問題研究会 (1981)] では格子状道路を想定して、望ましい配置間隔を提示している。これらを元に、[浅野, 桐越 (1983)] では道路網形態指標と土地利用の関係から道路網整備水準に関する考察を行っている。

都市の道路網パターンの特徴を把握する研究について、下記のように多くの手法が提案されている。[古山 (1977)] では、道路の辺長など分布形状の違いにより、都市間比較している。街路パターンの規則性について、[岡田, 田中 (1987)]、[水野, 掛井 (1990a)]、[水野, 掛井 (1990b)] では、道路網形態のフラクタル次元により解析している。交差点における接続関係について、[加藤, 小川, 河田 (1999)]、[加藤, 小川, 河田 (1999)] では接続次数に着目した上で、道路ベクトル図により道路形状との関係を考察している。[浅見, 神谷, 島津 (1999)] では、各種道路網に対するアンケート調査を用いた目視による判断と形態的特性の関係性を考察している。

道路網の構築原理を把握する研究には、[東海林, 貞広 (1998)]、[安井, 貞広 (2003)] では、交差点における道路の直進性を評価するために道路の角度を分析している。[木山, 古山 (2004)]、[木山, 古山 (2005)] では、スペース・シンタックス理論により都市内道路網の形態の経年的変

化を分析している。[早川, 大野 (2005)] ではベネチアでの大運河を基準とした道路網形成モデルを構築しているが、対象としている都市固有の要因から構築原理を考察しており、様々な都市においてモデルを適応できるとは限らない。

グラフ理論を元にした道路網における点数と辺数の関係を扱った分析において、計量地理学において中心性や結合性、近接性などを評価する様々な指標が提案されている([石水, 奥野 (1973)], [奥平 (1976)], [Taaffe, Gauthier, O'Kelly (1996)])。中でも、[野田 (1996)] で提案された GTP (Grid-Tree Proportion) は、正方格子状道路網との関係を評価するため結合性に関する各種指標を総合的に定式化した。

一方、頂点数と道路延長の関係を扱った分析において、大きくランダムラインモデルとネットワークコンストラクションモデルのアプローチがある([古山 (2002)])。前者は、[腰塚 (1978b)], [栗田 (1997)] において、道路網を対象領域を通過する一様にランダムな直線と見なし、積分幾何学を用いて道路延長が交差点数の平方根に比例するという「ルート N の法則」を明らかにしている。後者は、[谷村, 古山 (2001)], [谷村, 古山 (2003)] において、英国の都市における街路網について最小木・最短巡回路・外延木・ドロネー網などのグラフを構築して、道路網と重なる辺の割合から最適性や合理性を評価している。

密度や点と線の連結関係によって道路網形態を評価する研究では、形態指標は対象地区全体として算出し地区間比較をすることができ、地区内での道路網について評価することができない。そして、谷村らの研究では、近接性グラフについてはドロネー網しか用いられていない。道路網一本一本について近接性からみた構築原理について把握するためには、近接性に関するグラフを網羅的に用いて道路網形態の評価を行う必要がある。

1.2.3 移動から見た交通網の評価

前節の形態解析では、交通網の上を移動する交通需要を考慮した研究はみられない。それに対して、移動の利便性を評価したモデルでは、評価指標として移動距離と移動時間、通行量があげられる。これらは交通流動に伴い相互に関係する指標であるが、解析的に同時に取り扱うことが困難であることが多い。そこで、各モデルで重要視している指標ごとに既存研究を整理する。

移動距離に関するモデル

連続平面の移動を仮定している理論的モデルとして、直線距離 (Euclid 距離) や直交距離 (Rectilinear 距離) などを用いたものがある。ネットワーク空間上の移動については、最短経路問題として定式化されている。

移動距離に関する評価指標として、「移動距離」「直線距離との比」が用いられている。移動

第1章 はじめに

距離では利便性、直線距離との比では効率性を表している。

移動距離については、数多くの蓄積がある。[腰塚 (1986)] では、距離に関する理論的成果を網羅的にまとめ、二次元平面における移動の特徴を考察している。各種の規則的道路網を移動する場合の平均移動距離は、[Holroyd(1966)] でまとめられている。そして、移動の距離分布について、矩形領域における直線距離による移動は [Ghosh(1951)]、[腰塚 (1978a)] において、直交距離による移動は [Fairthorne(1963)]、[腰塚 (1996)] において導出されている。さらに、円盤領域において、[栗田 (2001)]、[栗田 (2004)] において直線距離、直交距離、放射環状距離で移動する場合について導出されている。[栗田 (2000)]、[松島, 栗田 (2003)] では、東京中心部を想定した $3/4$ 円盤領域における理論的距離（直線距離、放射・環状距離、直交距離）を導出し、4 種類の比例定数により道路距離との関係を算出している。

移動距離を用いて現実的道路網を評価した研究は、下記のようなものがある。点間を最短距離で移動する場合の利便性を評価する平均移動距離 [外井, 吉武 (1992)]、冗長性も考慮した [木村, 清水 (1987)] などの研究がある。グラフ理論に基づく隣接行列を用いた [野田 (1995)]、[野田 (1999)] では地利値、[岡田, 田中 (1988)] では区間地位指数によって、各交差点の地点や道路網区間での利便性を評価している。

一方、直線距離に対する移動距離の比については、移動距離の場合よりも蓄積は多くない。矩形領域における比の平均は、[腰塚, 小林 (1983)] において導出されている。比の分布については、正方形領域は [小林 (1983)]、矩形領域は [田中 (2005)]、円盤領域は [Larson, Odoni(1981)] において導出されている。

移動の総量から見た指標として、移動距離の平均を直線距離の平均で除した値を、[Vaughan(1987)] では Route Factor と定義している。[古山 (1988b)] では、最小木やドロネー網上を移動する場合の総距離や総迂回率を導出している。

上記の研究では、道路網の交差点などの代表点を移動需要の発生点としているが、交通ネットワーク上で移動需要が一様に発生する場合について、移動距離の比は [田村, 腰塚, 大澤 (2001)] にて導出されている。

このような連続移動モデルでは、ネットワーク上の移動距離との比較やその整備延長との関係について考察されていない。近接グラフを用いることで、近接性によって構築されたネットワークにおける形態的特性と移動利便性の分析を行うことができる。

高速交通網による移動時間に関するモデル

高速に移動できる交通網の整備により、移動時間を短縮する効果がある。高速交通網の総延長は長ければ長いほど利便性は高まるが、通常交通計画においては総延長などが所与である場合が多く、制約の中であるべく利便性の高い交通網を設計することが問題となる。こ

のような道路網の最適な計画としては、ネットワークデザイン問題として定式化されており、[久保, 田村, 松井 (2002)] で網羅的にレビューされている。

交通結節点の配置と移動時間との関係について、[Hall(1984)] では2種類の交通機関について格子状に配置された中継施設を利用した One-terminal と Two-terminal といった経路選択の違いにより考察している。このモデルを元に、[Aldaihanim, Quadrifoglio, et al.(2004)] では2階層の交通システムの乗換施設の配置において、移動時間を最小とする中継施設数を導出している。[三浦, 腰塚 (1993)] では正方形領域間での格子状の交通網において、[有井, 腰塚 (1997)] ではフリーアクセスを前提とした高速交通網の移動時間短縮効果を導出している。

移動時間を考慮した交通網の配置については、格子状道路については、[腰塚, 今井 (1991)] , [腰塚 (1994)] では交差点での停車時間も考慮した最適な交差点密度を導出し、[鈴木, 腰塚 (2004)] では移動距離分布及び移動時間分布を導出した上で平均移動時間を最小とする交通網配置を導出している。放射環状道路網については、[藤田, 鈴木 (2003)] , [藤田, 鈴木 (2004)] において、放射方向と環状方向における交通路の最適な割当を導出している。

移動需要が一様でない場合については、[古山 (1988a)] , [古山 (1988c)] では、移動が便利なほど需要が増加するグラビティ量を用いて交通網の整備の効果を測定している。

これらの高速交通網による移動時間に関するモデルは、高速移動による厳密な移動時間を算出している。しかし、現実の交通網では混雑現象が見られ、通行量の増加による移動時間の変化を考慮する必要がある。

通行量から見た混雑に関するモデル

移動の評価において、通行量も大きな要因である。混雑の度合いと、それによる移動時間の変化がモデル化されている。

連続平面における混雑現象を表している流動量の研究では、以下のような研究が挙げられる。連続移動モデルとして、[腰塚 (1992)] では1次元の直線都市の、[大津, 腰塚 (1997)] , [大津, 腰塚 (1998)] では2次元平面での流動量の地域的分布の理論モデルを構築し、都心への交通集中の構造を明確に記述している。また、[西野 (1994)] , [腰塚 (1994)] では、直線距離と直交距離で移動する場合の流動量の分布を導出し、長方形の領域において領域形状が細長いほど中心に流動が集中することを導き、道路の配置について考察している。

ネットワークにおけるモデルとして、[田口, 大山 (1993)] では、最短経路数え上げ問題 (Shortest Path Counting Problem: SPCP) として、最短経路で移動する時に通行量の多いリンクを導出することにより、道路網の区間の重要性を評価している。ネットワーク上から交通需要が発生する場合について、[腰塚 (1999)] では移動距離と通行量を導出し、放射状と格子状の配置パターンの比較を行っている。[田村, 腰塚, 大澤 (2003)] では、格子状道路網での一方通行規制

第1章 はじめに

の評価を行っている。

さらに、通行量と移動時間との関係として混雑現象を議論したモデルでは、数多く開発されている（[土木学会（1998）]）。格子状道路を中心として、道路網の延長や配置パターンによる混雑現象の影響を評価したモデルに下記の研究がある。[梶谷, 田村, 斉藤（1993）], [梶谷, 田村, 斉藤（1995）]では、均衡配分を行い交通容量を求め、望ましい配置パターンを評価している。[三浦（1999）]では、道路の総延長を変化させたときの移動時間との関係を考察している。

通行量から見た混雑に関するモデルでは、所与の交通網を用いた詳細な分析をできるが、あらかじめ用意した代替案しか検討できない。そこで、領域形状や総延長など移動利便性に関する深いパラメータによる、より操作性の高い解析モデルを構築することに意義がある。

1.2.4 輸送システムにおける階層構造の最適化

積み替えなどの階層輸送システムについては、これまで様々な学問領域において、類似する都市の階層構造について記述するモデルが提案されている。ここでは、階層数によって空間構造が規定されるモデルについて整理することとする。

階層構造を記述する古典的数理モデル

中心地理論では、都市の階層構造とその空間的パターンについて、都市機能の集積に関する一連の研究がある。[Christaller(1933)]では、中心地（都市）が三角格子上に立地する仮定の下で、財の到達範囲によって、都市の階層が上がるに従って下位中心地の数が k 倍で増加していく厳密な階層構造が形成されることが示されている。また、[Lösch(1940)]によって、 k が一般化されたモデルが提案され、複数の財を提供する場合についての連続的な規模分布を持つ階層構造が導出されている。

地形学の分野では、[Horton(1945)]によって河川の分岐形態について論じたHortonの法則が検証されている。特に、第一法則として、河川流域において水路に順位をつけて次数化を行い、 S をその流域の水路の最高次数、 o をある水路の次数、 N_o を o 次の水路の数とし、 r_b を分岐比と定義すると、

$$N_o = r_b^{(S-o)} \quad (1.2.1)$$

と言う関係が存在し、現実の河川においてもかなり適応できるとしている。そして、[Shreve(1966)]ではランダムな水路網において、[徳永（1966）]では次数変換に無関係な上位へ流入する水路数を考慮することによって、次数が高くなるに従って分岐比が減少することが確認されている。交通分野への応用では、[Hagget(1967)]において木構造の高速道路について分析が行われている。

表 1.1: 施設配置問題の分類

立地候補点	総費用最小化	最大費用最小化	手法
連続	Weber 問題	MinMax 問題	非線形計画問題
離散	Median 問題	Center 問題	整数計画問題

階層構造を記述する古典的数理モデルでは、三角格子など幾何学的特性によって階層構造が規定されてしまう。そこで、交通網の発展による移動に関わる費用や都市の移動需要の変化により、階層構造がどのような影響を受けるのかを考察する必要がある。

階層構造を考慮した施設配置問題

[Daskin(1995), 杉浦 (1989)] などによると、一般的な施設配置問題では、需要点の分布や施設立地可能点の制約によって大きく表 1.1 のように分類される。需要点や需要量の位置が施設配置に大きな影響を与えるが、施設配置計画の初期段階において、ある程度の近似的なデータを用いて配置する施設数とその利便性の評価を行う場合がある。

人口と施設数の関係について、施設数を連続的に取り扱った [Stephan(1988)], [鈴木 (1999b)] などによる「順位規模法則」がある。これは人口・施設数ともに十分大きい場合に、連続近似モデルとして定式化して移動時間最小化による最適化を行うと、1 施設の受け持つ面積は需要密度の $-2/3$ 乗に比例するものである。同様に、[栗田 (1999)] は、施設費用を非線形関数とした場合に、移動費用と施設費用の和を最小とする施設数について解析的に求めている。また、[鈴木 (1999a)] は、median 問題として定式化した場合と解の違いによって、施設数の連続近似によって成立する規模密度法則の有効性を議論している。

施設費用と輸送費用の和である総費用を最小化とする施設の階層構造に注目した研究に [Dökmeci(1973)] がある。3 階層の施設について、階層毎の施設費用を所与として、最適な階層数とその施設数を算出している。そして、施設数が増加する程、輸送費用は減少するが施設費用が増加するというサービスとコストのトレードオフ関係を表現している。

また、利用者出向き型施設において、利用者の移動距離から見た施設数の最適化を図ったモデルとして、[鈴木 (1990)] では階層数が連続的に変化する場合、[奥貫, 岡部 (1995)] では探索的アルゴリズムでの結果とそれぞれ比較している。[貞広, 岡部 (1994)] では、最近隣の上位階層の施設に割り当てる条件で、現実の商業施設の店舗分布から階層構造を算出している。

施設の供給するサービスの機能により階層構造が見られ、上位的なサービスを行う施設と、より下位的サービスを行う施設の関係について、提供するサービスの種類によって様々な特性が見られる。こうした階層システムにおける施設配置問題の定式化について、統一的分類を行った [Narula(1984)], [岡部, 奥貫 (1993)] では、

第1章 はじめに

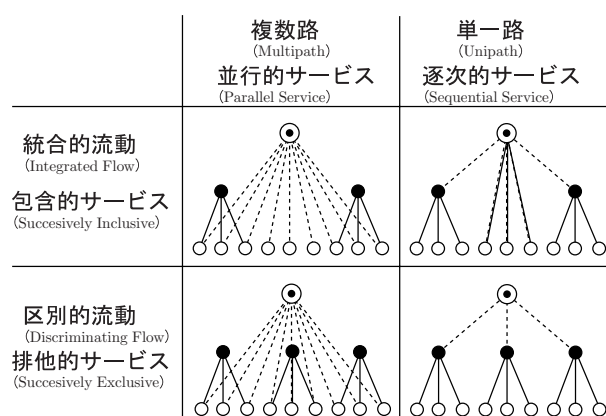


図 1.4: サービス提供方法と移動規則による階層的施設の分類

- 施設階層によるサービス提供方法：Successively inclusive, Successively exclusive
- グラフ理論による移動形態：Arc Flow として I(Integrated) と D(Discriminating), Node Flow として M(Multipath) と U(Unipath)

を用いて分類する方法が提案されている．そして，[Church, Eaton(1987)] では，サービスの提供形態 (Parallel Service, Sequential Service, Referral Service) によって分類した．これらを総括すると，図 1.4 ([家田 (1997)] を元に作成) のようになる．

階層構造を考慮した施設配置問題では，各階層ごとの施設自体が目的地となっており，図 1.4 の左上側に分類される．一方，本研究で取り上げる「輸送」を考えると，最終目的地への施設間の移動について考慮する図 1.4 の右下側に分類されるため，施設配置問題とは異なる定式化が必要となる．

輸送中継施設の配置問題

輸送システムの最適化に関して，施設配置問題や配送計画問題のように，オペレーションズ・リサーチにおいて各種モデルが提案されている．[Eilon, Watson-Gandy, Christides(1971)] では，物流への応用を目的として，施設配置や巡回路などについて基礎的なモデルをまとめている．そして，近年のサプライチェーンマネジメントなど物流システム高度化に対応したモデルが多数開発されており，[Crainic, Laporte(1997)] で網羅的レビューがまとめられている．物流システムにおける施設配置については，[Daskin(1985)]，[Klose, Drexl(2005)] などで詳細なレビューがされている．輸送費用の費用関数の分類については，[Higginson(1993)] においてまとめられている．

施設配置において，離散最適化では大規模な問題に対応できないことを克服するために，連続量近似 (Continuous Approximation) を用いた輸送システムの最適化について多くの蓄積がある．

[Langevin, Mbaraga, Campbell(1996)]において詳細なレビューがなされており, [Daganzo(1999)]では施設や運行間隔, 在庫量に関する複数のモデルの定式化を行い物流システムの最適化について解析的算出を行っている. 施設配置について連続近似を用いた研究として, [Campbell(1990)]では輸送費用において輸送量に関する規模の経済性がある場合, [Campbell(1993)]では巡回移動を考慮した場合, [鈴木, 川口(1998)]は一次元都市での最適な積み替え施設配置, [笠原, 古山(1998)]は木の総延長を最小化する領域分割数を解析的に算出している.

わが国の物流システムについて, 実証的に輸送の階層構造を扱った研究として, 主に土木計画学の分野で研究が進めれてきた. 停車間隔最適化として, [松本(1990)]では輸送費用と在庫費用のトレードオフを, [家田, 佐野, 常山(1992)]では横持ち移動を考慮したモデルを構築した. 集配センターの立地と集配経路を同時に決定するモデルとして, [徳永, 岡田, 須田(1995)]がある. 輸送量に関する規模の経済性を考慮した施設配置問題として, [石黒, 桜田, 稲村(2000)]で分割配分法により総輸送費用を最小化するモデルを構築した. 最適な輸送階層数を導出することを目的とし, 輸送量に関する規模の経済性に着目したマクロレベルな研究として, [家田(1997)]では動的計画法によって, [Kijmanawat, Ieda(2004)]では数理計画法による Hub and Spoke 型施設配置問題としてモデルを構築している.

また, 地理学においても主に空間構造化や輸送ネットワーク形成過程について, 歴史的・空間的に調査されている. [斉藤(1971)], [斉藤(1989)]では, 東京を中心として酪農家から加工工場へ牛乳が集められる集乳過程の階層性について考察している. 上位の集乳圏は下位の集乳圏を構造的に包含し, 集乳圏の次数が高まれば, よりマクロな地域となっていくことが図示されている.

輸送から見た中継施設の配置問題において, 多くの研究では一度しか中継施設を利用しないため階層数が2階層に固定されている. そして, 最適な輸送階層数を目指した研究は, 家田らによる一連の研究しか見られないが, 数値計算によるパラメータの特性の考察に留まり, かつ輸送距離による規模の経済性については触れられていない. 需要点や配置する施設数が大規模な問題になると, 一般的に大域的最適解を求めることは困難であるので, 連続近似を行うことが有効である.

第1章 はじめに

1.3 研究の構成

本論文は全6章で構成され、交通網を対象として離散空間モデルと連続空間モデルの両方の観点から、交通網の形態解析と移動利便性の分析について基礎的な考察を行う。図1.5のように構成され、表1.2のように各章のモデルで扱う空間と距離による相互関係をまとめることができる。

第2章と第3章では、主に離散的に構築される交通網を対象とした形態分析を行う。詳細な交通網を対象しているため、空間スケールはミクロな街区レベル、区画道路への応用を想定している。まず、第2章では、交通網の構築原理として代表している「近接性」によって構築されるグラフの性質を明らかにする。特に、近接性の異なる各グラフの辺の長さとそのグラフ上の移動距離を導出し、格子状道路網における辺の長さとの関係を明らかにする。そして、第3章では、近接性に関するグラフを用いて現実の都市内道路網の形態解析を行い、道路網一本一本の構築原理を把握し、特に第2章において考察した格子状道路網との関係について分析する。

第4章と第5章では、主に連続的に移動できる交通網を対象とした移動利便性の評価を行う。近似的な交通網を対象としているため、空間スケールはよりマクロな都市・国土レベルといったへの応用を想定している。まず、第4章では、第3章において代表的な市街地において格子状道路網が密に整備されていることを踏まえ、第2章で論じた交通網の整備効果について、格子状道路網を対象とした高速移動できるネットワークにおいて、移動時間と通行量から見た最適な形態を考察する。そして、第5章では、第4章での2階層輸送を発展させて、複数階層の輸送での中継施設について、輸送費用における規模の経済性に着目し、空間の次元、需要量、移動経路の違いによる最適な階層構造を考察する。

最後に、第6章にて、本研究で得られた主な結論と残された課題について述べる。

なお、各章の内容の一部は、以下の論文で報告済みである。

- 第2章：[渡部, 鈴木, 腰塚 (2004a)], [渡部 (2005c)]
- 第3章：[渡部 (2005a)], [渡部 (2005b)], [渡部 (2005d)]
- 第4章：[渡部, 鈴木, 他 (1999)], [渡部, 鈴木 (1999)]
- 第5章：[渡部, 鈴木 (2000a)], [渡部, 鈴木 (2000b)], [渡部 (2002)], [渡部, 鈴木 (2003)], [Watanabe, Suzuki (2003)], [渡部, 鈴木, 腰塚 (2004b)]

表 1.2: 対象とする空間と距離によるモデルの分類

空間 距離	連続			離散	
	直線距離	直交距離	べき乗距離	近接グラフ	道路網
第2章					
第3章					
第4章					
第5章					

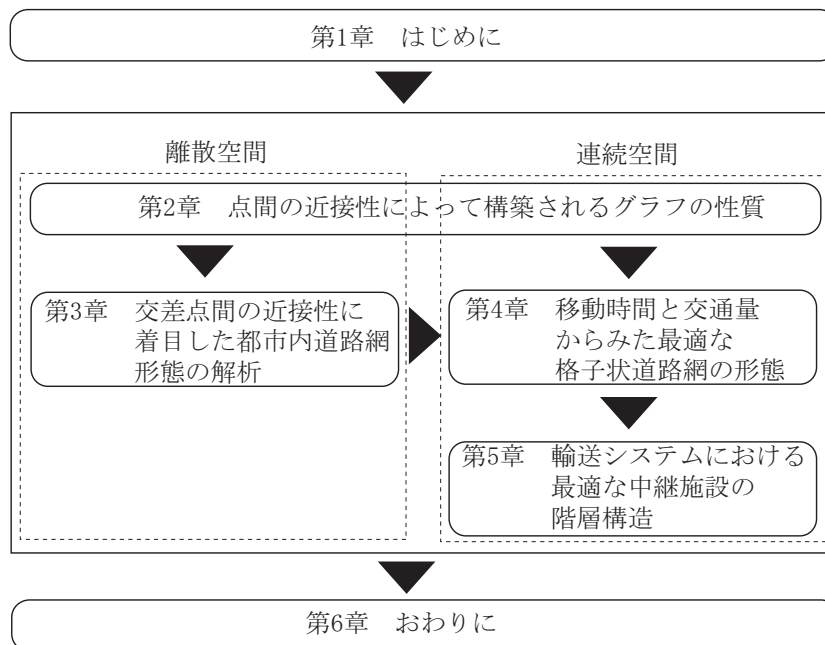


図 1.5: 本論文の構成

第2章 点間の近接性によって構築されるグラフの性質

2.1 はじめに

本章では、点間の近接性によって構築されるグラフの形態的特性と移動利便性について考察を行う。これらのグラフは、次章での現実の都市内道路網における形態解析における理論的基礎と位置づけられる。

古代からの交通網の構築原理について考察するとき、原始では距離に対する移動抵抗が高かったため、集落と集落を結ぶようなローカルな交通網は「近接性」で代表されるように近い場所を結んでいくことにより構築されていたことが推測される。そして、交通網の総延長と各区間距離を導出することによって、都市インフラの建設・維持への基礎的知見が得られる。また、そのネットワーク上の移動距離から利便性を計算することができ、交通網の整備に関する評価を行うことができる。

そこで、道路網を想定した交通網を点と線で模式的に表すためにグラフとして定義し、都市内の点を結ぶ線の施設と見なした近接性に関するグラフの性質について統一的に考察する。そして、近接性に関するグラフを交通網と見なして移動する場合、理論的移動距離との比較を行い、移動の利便性の評価を行う。

本章は下記のように構成される。まず2.2節において、グラフを定義した上で、各種近接性に関するグラフを構築する方法をまとめる。そして、2.3節において、近接性に関するグラフの形態的特性を比較するために、二次元平面におけるランダムに分布する点において構築されたグラフ辺の長さに関して、幾何確率に基づく探索領域を限定した最近隣距離を用いたグラフ辺の長さや本数の性質を考察する。さらに、2.4節において、ランダムな点において移動需要がある場合にグラフ上の移動距離を算出し、移動距離分布と直線距離との比について、既存の直線距離と直交距離による連続移動モデルによって得られた結果との比較を行う。またランダムな点分布と規則的な点分布との比較を行うことにより、都市計画において代表的な道路網パターンである格子状道路網との性質の違いについて考察を行う。

第2章 点間の近接性によって構築されるグラフの性質

2.2 近接性によって構築されるグラフ

本節では、近接性に関するグラフを構築するための準備として、グラフ理論によるグラフと用語の定義を行い、各種近接性に関するグラフの定義を行う。

2.2.1 グラフの定義

点と線の連結関係を表現する際には、グラフ理論が用いられる。領域の面積 S 、二点 p_i, p_j 間の直線距離を $d(p_i, p_j)$ とする。グラフは、点の集合 $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ 、点に接続する辺の集合 $E = \{e_1, \dots, e_m\}$ の組であり、 $G = (P, E)$ で表す。点の総数は $|P| = n$ 、辺の総数は $|E| = m$ である。点の密度は、 $\rho = n/S$ である。

一般的な表記として、名前が PG である近接グラフは $G_{PG} = (P, E_{PG})$ と表す。

辺の向きを考えないグラフを無向グラフ、向きを考えるグラフは有向グラフと呼ぶ。有向辺の場合は、点に始点と終点の区別が必要となる。無向辺で全ての点間に辺が存在するとき、完全グラフ (Complete Graph: CG) と呼び、 $G_{CG} = (P, E_{CG})$ と表す。

また、 $G = (P, E)$ で $P \subseteq P'$ に両端点を持つ辺の集合を $E \subseteq E'$ とするとき、グラフ $G' = (P', E')$ を G の部分グラフと呼ぶ。

2.2.2 近接グラフ及びそれに関連したグラフの定義

ドロネー網に代表されるような平面上において点同士の近さに基づいて定義されるグラフは、近接グラフ (Proximity Graph, PG) と呼ばれる。代表的な近接グラフとして、下記の 5 種類のグラフがある。

- 孤立最近接対 (Reciprocal Pairs, RP) : RP は、点 p_i から見て点 p_j が最も近く、かつ点 p_j から見て点 p_i が最も近い点の場合に、二点間を結ぶ有向辺のグラフである。本研究では二点間が結ぶ無向辺として扱い、 $G_{RP} = (P, E_{RP})$ と表す。二点間の距離が、

$$d(p_i, p_j) \leq \min_{k(\neq i, j)} \min\{d(p_i, p_k), d(p_j, p_k)\} \quad (2.2.1)$$

である場合に構築される。

- 最近傍グラフ (Nearest Neighborhood Graph, NNG) : NNG は、点 p_i から見て点 p_j が最も近い点の場合に、二点間を結ぶ有向辺のグラフである。本研究では二点間を結ぶ無向辺として扱い、 $G_{NNG} = (P, E_{NNG})$ と表す。二点間の距離が、

$$d(p_i, p_j) \leq \min_{k(\neq i)} \{d(p_i, p_k)\} \quad (2.2.2)$$

である場合に構築される。

2.2. 近接性によって構築されるグラフ

- 相対近傍グラフ (Relative Neighborhood Graph, RNG) : RNG は, 点 p_i と点 p_j を中心として 2 点を結ぶ線分を半径とする円の重複部分に二点以外の点がない場合に, 二点間を結ぶ辺で構成されるグラフであり, $G_{\text{RNG}} = (P, E_{\text{RNG}})$ と表す. 二点間の距離が,

$$d(p_i, p_j) \leq \min_{k(\neq i, j)} \max\{d(p_i, p_k), d(p_j, p_k)\} \quad (2.2.3)$$

である場合に構築される. このグラフは, [Toussaint(1980)] にて提案されている.

- ガブリエルグラフ (Gabriel Graph, GG) : GG は, 点 p_i と点 p_j を中心として 2 点を結ぶ線分を直径とする円の内部に二点以外の点がない場合に, 二点間を結ぶ辺で構成されるグラフであり, $G_{\text{GG}} = (P, E_{\text{GG}})$ と表す. 二点間の距離が,

$$d(p_i, p_j) \leq \sqrt{d(p_i, p_k)^2 + d(p_j, p_k)^2} \quad (2.2.4)$$

である場合に構築される. このグラフは, [Gabriel, Sokal(1969)] にて提案されている.

- ドローネ網 (Delaunay Triangle, DT) : DT は, 三点以上の点に内接する円の内部に他の点がない場合に, それらの点を結ぶ辺で構成されるグラフであり, $G_{\text{DT}} = (P, E_{\text{DT}})$ と表す. ボロノイ図の双対グラフであり, このグラフは [Delaunay(1928)] にて提案されている.

上記の構築方法をまとめると, 各グラフは図 2.1 における灰色部分で表されている各探索領域内に点がないれば, 点間を辺で連結することができる.

これら近接グラフと非常に関係が深いグラフとして, 下記の最小木がある.

- 最小木 (Minimum Spanning Tree, MST) : MST は, 全ての点を結ぶグラフのうちで辺の総長が最小であるグラフであり, $G_{\text{MST}} = (P, E_{\text{MST}})$ と表す. 閉路を含まないので, 辺

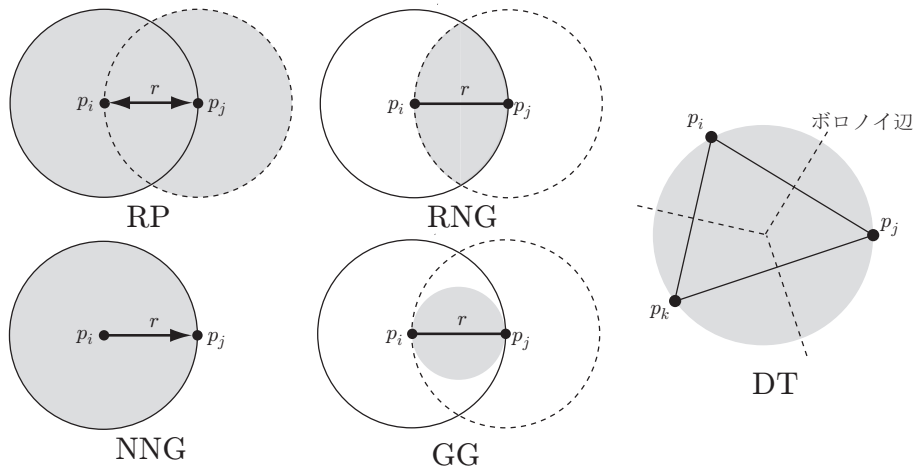
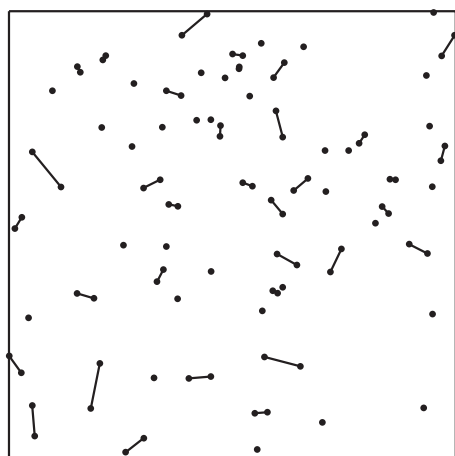
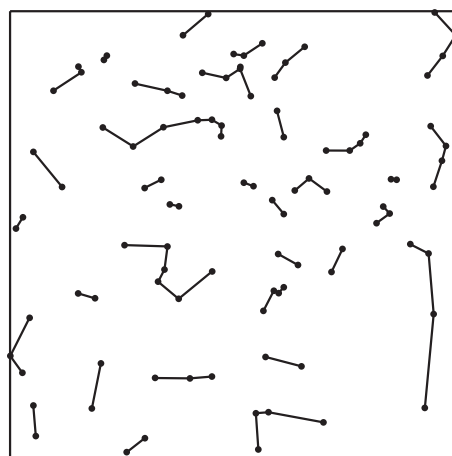


図 2.1: 各近接グラフの構築法に基づく探索領域

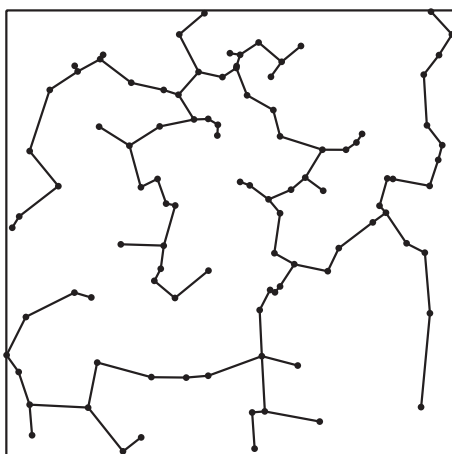
第2章 点間の近接性によって構築されるグラフの性質



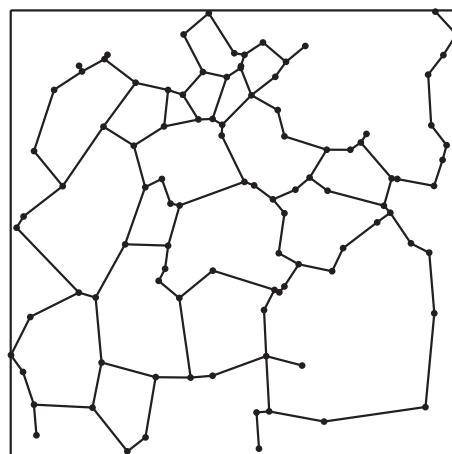
孤立最近接対



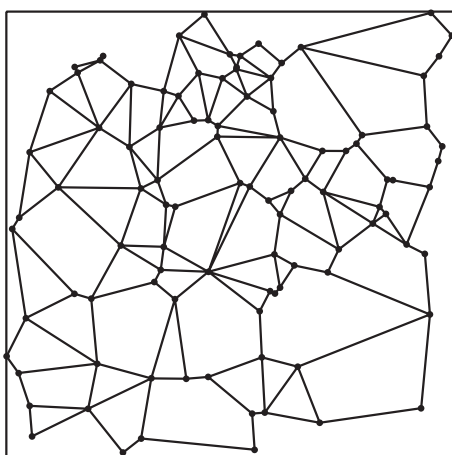
最近傍グラフ



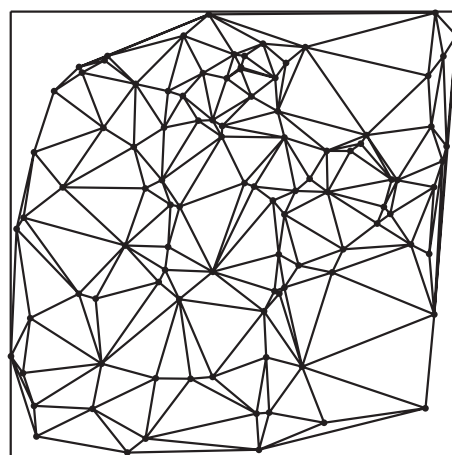
最小木



相対近傍グラフ



ガブリエルグラフ



ドロースネ網

図 2.2: 近接グラフの構築例 (一様にランダム点: 100 点)

2.3. 近接グラフ及びそれに関連したグラフの構築辺に関する形態的性質

の本数は $m_{\text{MST}} = n - 1$ と規定される．このグラフは，[Kruskal(1956)]，[Prim(1957)]により効率的な構築法が提案されている．

各グラフ間の関係は， $E_{\text{RP}} \subseteq E_{\text{NNG}} \subseteq E_{\text{MST}} \subseteq E_{\text{RNG}} \subseteq E_{\text{GG}} \subseteq E_{\text{DT}}$ であることが示されている．つまり，これまで紹介したグラフは全てドローネ網の部分グラフである．最小木だけが局所的な点の近接性だけでなく全体の最適性が必要となるが，ドローネ網の部分グラフである他の近接グラフとも非常に関係が深いことが分かる．

一様ランダムに発生させた点（100点）において，上記の近接グラフを構築した結果は，図2.2のようになる．これより，同じ点分布であっても点間の近接性の捉え方の違いによって構築されるグラフが異なることが分かる．

- 完全グラフ (Complete Graph, CG) : CG とは，全ての点間を結ぶ辺で構成されるグラフ $G_{\text{CG}} = (P, E_{\text{CG}})$ である．全ての点間を結ぶので，辺の本数は $m_{\text{CG}} = n(n - 1)/2$ と規定される．

これまで紹介してきた近接性に関するグラフは，完全グラフの部分グラフである．

2.3 近接グラフ及びそれに関連したグラフの構築辺に関する形態的性質

本節では，前節で説明した近接グラフ及びそれに関連したグラフについて，ランダムな点分布において構築された辺の特性として辺の長さに注目し，構築方法との関係を考察する．そして，規則的点分布における近接グラフとの比較を行う．

2.3.1 ランダム点分布におけるグラフの辺の長さ

一様ランダムに発生させた点が与えられた時，ある二点間の距離 L を確率変数 l とし，この二点が結ばれるときにはその辺の長さとなる．各近接グラフの辺の長さは，点の密度 ρ を用いて，確率密度関数 $f(l)$ ，期待値 μ ，分散 σ^2 を導出する．

孤立最近接対 (RP)

互いに最も近い点である場合のみ接続する辺で構成されるグラフである．辺長は [Pickard(1982)] にて，

$$f_{\text{RP}}(l) = 2 \left(\frac{4}{3}\pi + \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \rho l e^{-\left(\frac{4}{3}\pi + \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \rho l^2} \quad (2.3.1)$$

$$\mu_{\text{RP}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\rho(4\pi/3 + \sqrt{3}/2)}} \simeq \frac{0.394178}{\sqrt{\rho}} \quad (2.3.2)$$

$$\sigma_{\text{RP}}^2 = \frac{4 - \pi}{4\rho(4\pi/3 + \sqrt{3}/2)} \quad (2.3.3)$$

第2章 点間の近接性によって構築されるグラフの性質

と導出されている．

最近傍グラフ (NNG)

最も近い点へ向かう有向辺で構成されるグラフである．最近傍グラフの辺の長さは最近隣距離 ([腰塚 (1985)]) として知られており，辺長は [Clark, Evans (1954)] にて，

$$f_{\text{NNG}}(l) = 2\rho\pi l e^{-\rho\pi l^2} \quad (2.3.4)$$

$$\mu_{\text{NNG}} = \frac{1}{2\sqrt{\rho}} = \frac{0.5}{\sqrt{\rho}} \quad (2.3.5)$$

$$\sigma_{\text{NNG}}^2 = \frac{4 - \pi}{4\rho\pi} \quad (2.3.6)$$

と導出されている．

ガブリエルグラフ (GG)

二点間を直径とする円が空円の場合に二点間を結ぶ辺で構成されるグラフである．辺長は [Möller (1994)] にて，

$$f_{\text{GG}}(l) = \frac{1}{2}\rho\pi l e^{-\frac{1}{4}\rho\pi l^2} \quad (2.3.7)$$

$$\mu_{\text{GG}} = \frac{1}{\sqrt{\rho}} \quad (2.3.8)$$

$$\sigma_{\text{GG}}^2 = \frac{4 - \pi}{\pi\rho} \quad (2.3.9)$$

と導出されている．

ドローネ網 (DT)

三点の外接円に点がない場合のみ接続する辺で構成されるグラフである．辺長は [Collins (1968)] , [Miles (1970)] にて，

$$f_{\text{DT}}(l) = \frac{\pi\rho l}{3} \left\{ \sqrt{\rho} l e^{-\frac{1}{4}\pi\rho l^2} + \text{Erfc} \left(\frac{1}{2}\sqrt{\pi\rho} l \right) \right\} \quad (2.3.10)$$

$$\mu_{\text{DT}} = \frac{32}{9\pi\sqrt{\rho}} \quad (2.3.11)$$

$$\sigma_{\text{DT}}^2 = \frac{5}{\pi\rho} - \frac{1024}{81\pi^2\rho} \quad (2.3.12)$$

と導出されている．但し，Erfc は Gauss の誤差関数である．

相対近傍グラフ (RNG)

RNG の長さに関する既存研究はないが，以下のように導出できる．

2.3. 近接グラフ及びそれに関連したグラフの構築辺に関する形態的性質

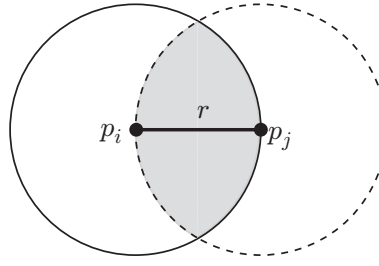


図 2.3: 探索領域を限定した場合の最近隣距離（相対近傍グラフ）

まず，探索領域を限定した最近隣距離の導出を考える．母点群が大局的な密度 ρ で一様にランダムに分布しているとき，面積 A の領域に母点が x 個ある確率 $\text{Pr}(x, A)$ は，ポアソン分布に従うことが知られており，

$$\text{Pr}(x, A) = \frac{(\rho A)^x}{x!} e^{-\rho A} \quad (2.3.13)$$

と表すことができる．よって，面積 A の探索領域内に母点が一個も存在しない確率は

$$\text{Pr}(0, A) = e^{-\rho A} \quad (2.3.14)$$

となる．

探索領域内の最も近い一つの点までの距離 L が l 以下となるのは，探索領域の面積 A の中に少なくとも 1 つの点が含まれている場合である．よって，二点間の距離が l 以下である確率 $F(l)$ は，

$$F(l) = 1 - \text{Pr}(0, A) \quad (2.3.15)$$

と求められる．

この $F(l)$ は求める確率密度関数 $f(l)$ の累積であるから， $f(l)$ は l で微分することにより，

$$f(l) = -\frac{d\text{Pr}(0, A)}{dl} \quad (2.3.16)$$

$$= -\frac{d}{dl} e^{-\rho A} \quad (2.3.17)$$

と求められる．

相対近傍グラフとは，二点間を半径とする円の重複部分に点がない場合に二点間を結ぶ辺で構成されるグラフである．よって，図 2.3 の灰色の部分である探索領域の面積 $A = (2\pi/3 - \sqrt{3}/2)l^2$ を代入することにより，求められる．

ここで，数式展開のために l と関係のない項を $\omega = (2\pi/3 - \sqrt{3}/2)$ と集約して， $A = \omega l^2$ であるような領域について求める．代入すると式 (2.3.17) は，

$$\begin{aligned} f(l) &= -\frac{d}{dl} e^{-\rho \omega l^2} \\ &= 2\rho \omega l e^{-\rho \omega l^2} \end{aligned} \quad (2.3.18)$$

第2章 点間の近接性によって構築されるグラフの性質

となる．ここで，ラプラス変換の公式より，

$$\int_0^{\infty} x^{b-1} e^{-ax^c} dx = \frac{\Gamma(b/c)}{ca^{b/c}} \quad (2.3.19)$$

となることが知られている．これを利用すると，二点間の長さの期待値 μ は，

$$\begin{aligned} \mu &= \int_0^{\infty} l f(l) dl \\ &= 2\rho\omega \int_0^{\infty} l^2 e^{-\rho\omega l^2} dl \\ &= 2\rho\omega \frac{\Gamma(3/2)}{2(\rho\omega)^{3/2}} \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\rho\omega}} \end{aligned} \quad (2.3.20)$$

と求まる．そして，分散 σ^2 は，

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \int_0^{\infty} (l - \mu)^2 f(l) dl \\ &= \int_0^{\infty} l^2 f(l) dl - \mu^2 \\ &= \frac{1}{\rho\omega} - \frac{\pi}{4\rho\omega} \\ &= \frac{4 - \pi}{4\rho\omega} \end{aligned} \quad (2.3.21)$$

と求まる．

この結果，辺の長さの確率密度関数 $f(l)$ は式 (2.3.18)，期待値は式 (2.3.20)，分散は式 (2.3.21) に $\omega = (2\pi/3 - \sqrt{3}/2)$ をそれぞれ代入することにより，

$$f_{\text{RNG}}(l) = 2 \left(\frac{2}{3}\pi - \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \rho l e^{-\left(\frac{2}{3}\pi - \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \rho l^2} \quad (2.3.22)$$

$$\mu_{\text{RNG}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\rho(2\pi/3 - \sqrt{3}/2)}} \simeq \frac{0.799614}{\sqrt{\rho}} \quad (2.3.23)$$

$$\sigma_{\text{RNG}}^2 = \frac{4 - \pi}{4(2\pi/3 - \sqrt{3}/2)\rho} \quad (2.3.24)$$

と求まる．

最小木 (MST)

ローカルな情報だけで構築できる近接グラフに比べて，グローバルな情報が必要となる最小木は点密度を利用した幾何確率による長さの推定は困難である．

そこで，本研究では最小木の構築原理の近似を行い，近接性による幾何確率から長さを求める．最小木とは，全ての点を結ぶグラフのうちで辺の総長が最小のグラフであり，閉路ができ

2.3. 近接グラフ及びそれに関係したグラフの構築辺に関する形態的性質

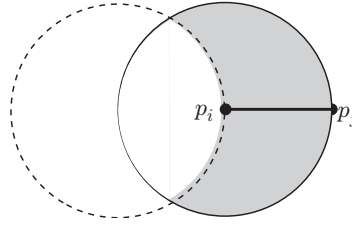


図 2.4: 探索領域を限定した場合の最近隣距離（最小木）

ないという条件が必要である．そこで，局所的に孤立しない辺の集まりであると近似的に考えることにより，最小木の推定値とする．

この構築原理を図示すると，二点間を半径とする円の重複部分に点がない場合に二点間を結ぶ辺で構成されるグラフである．よって，図 2.4 の灰色の部分である探索領域の面積 $A = (\pi/3 + \sqrt{3}/2)l^2$ を代入することにより，求められる．ここで，数式展開のために l と関係のない項を $\omega = (\pi/3 + \sqrt{3}/2)$ と集約して， $A = \omega l^2$ であるような領域について求める．

これにより，RNG と同じ作法で，辺の長さの確率密度関数 $f(l)$ は式 (2.3.18)，期待値は式 (2.3.20)，分散は式 (2.3.21) に $\omega = (\pi/3 + \sqrt{3}/2)$ をそれぞれ代入することにより，

$$f_{\text{MST}}(l) = 2 \left(\frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \rho l e^{-\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \rho l^2} \quad (2.3.25)$$

$$\mu_{\text{MST}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\rho(\pi/3 + \sqrt{3}/2)}} \simeq \frac{0.640711}{\sqrt{\rho}} \quad (2.3.26)$$

$$\sigma_{\text{MST}}^2 = \frac{4 - \pi}{4(\pi/3 + \sqrt{3}/2)\rho} \quad (2.3.27)$$

と求まる．

辺長の期待値の式 (2.3.26) について，既存研究との比較を行う．一辺の長さの下界値として，[古山 (2003)] では数理実験による近隣辺の構成比率より $0.64/\sqrt{\rho}$ と推定されており，今回の結果とかなり近いことが分かる．一方，上界値として，[Robert (1968)] で $0.707/\sqrt{\rho}$ と推定されており，今回の結果はこの値を下回っている．よって，辺長の期待値の面から，下限値に近い性質があることが分かった．

グラフの辺長分布の比較

各グラフの辺長の確率密度関数をプロットすると，図 2.5 のようになる ($\rho=1$)．これまで見てきた六種類のグラフは，孤立最近接対 RP からドローネ網 DT へと点の探索領域が小さくなるほど，結ぶことができる点の数が増えるために，より長い辺が生じやすくなる．特に前節で導出した相対近傍グラフ RNG と最小木 MST は，最近傍グラフ NNG とドローネ網 DT の中間の辺の長さとなる．

第2章 点間の近接性によって構築されるグラフの性質

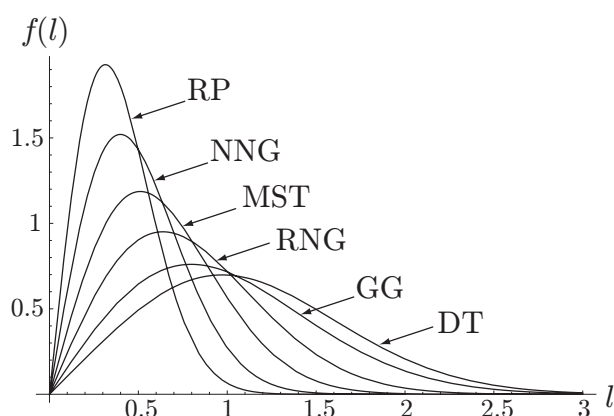


図 2.5: 近接性に関するグラフの辺長分布

この図からも，グラフの辺の長さの分布が右にシフトしており，それとともに期待値と分散も大きくなっていることが分かる．

2.3.2 規則的格子との比較

各規則的点分布における近接グラフは，図 2.6 のようになる．なお，点が退化している場合については，辺として含めている．特に，正方格子，三角格子，六角格子という模式的な道路網は，全ての点分布における相対近傍グラフ（RNG）で説明できることが明らかになった．

面積 S の領域に n 個の点が一樣に分布する場合，境界の条件を考慮しないことにより，辺の総辺数は表 2.1，総辺長は表 2.2 のようにまとめられる．

そして，規則的格子における各グラフの平均辺長は総辺長を総辺数で除することで求め，前節のランダム点の結果とあわせると，表 2.3 のように求まる．これを点の密度 $\rho = 1$ において図示すると，図 2.7 のようになる．ランダム点において構築されるグラフは，孤立最近接対からドロースネ網へと近接性が変化すると，平均辺長は増加し続ける．孤立最近接対 RP から Gabriel グラフ GG まで，平均辺長は各規則的格子と比較しても短い，ドロースネ網において三角格子点よりも長くなり，正方格子とほとんど差がなくなる程度に長くなる．一方，各規則的格子点において構築されるグラフは，孤立最近接対からドロースネ網へと近接性が変化しても，それほど平均辺長に変化がない．

これより，ランダムな点分布におけるグラフ辺の平均的な長さは，グラフの構築原理である点の近接性によって大きく影響を受けることが分かる．

2.3. 近接グラフ及びそれに関連したグラフの構築辺に関する形態的性質

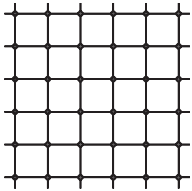
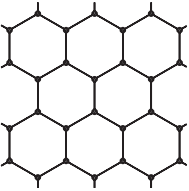
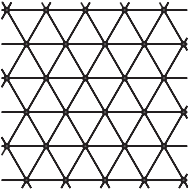
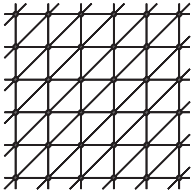
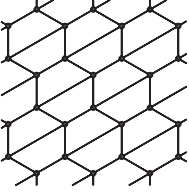
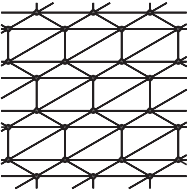
	三角格子点	正方格子点	六角格子点
相対近傍 グラフ (RNG)			
ガブリエル グラフ (GG)			
ドローネ網 (DT)			

図 2.6: 各規則的点分布における近接グラフ

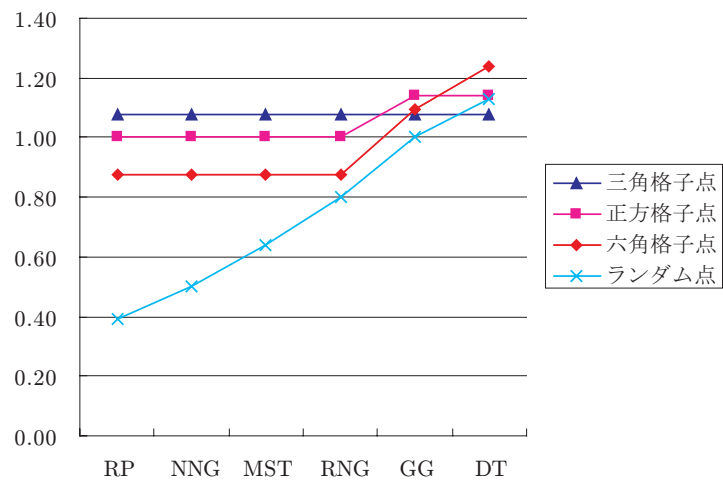


図 2.7: 規則的格子とランダム点における各グラフの平均辺長

第2章 点間の近接性によって構築されるグラフの性質

表 2.1: 規則的格子における各グラフの辺の総本数

	三角格子点	正方格子点	六角格子点
孤立最近接対 RP	$\frac{1}{2}n$	$\frac{1}{2}n$	$\frac{1}{2}n$
最近傍グラフ NNG	n	n	n
最小木 MST	$n - 1$	$n - 1$	$n - 1$
相対近傍グラフ RNG	$3n$	$2n$	$\frac{3}{2}n$
ガブリエルグラフ GG		$3n$	$2n$
ドローネ網 DT			$3n$

表 2.2: 規則的格子における各グラフ辺の総延長

	三角格子点	正方格子点	六角格子点
孤立最近接対 RP	$\frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{2\sqrt{3}}} \sqrt{nS}$	$\frac{1}{2} \sqrt{nS}$	$\frac{1}{\sqrt{3\sqrt{3}}} \sqrt{nS}$
最近傍グラフ NNG	$\sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}}} \sqrt{nS}$	\sqrt{nS}	$\frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}}} \sqrt{nS}$
最小木 MST	$(n - 1) \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}}} \sqrt{\frac{S}{n}}$	$(n - 1) \sqrt{\frac{S}{n}}$	$(n - 1) \frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}}} \sqrt{\frac{S}{n}}$
相対近傍グラフ RNG	$3 \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}}} \sqrt{nS}$	$2 \sqrt{nS}$	$\sqrt{\frac{3}{\sqrt{3}}} \sqrt{nS}$
ガブリエルグラフ GG		$(2 + \sqrt{2}) \sqrt{nS}$	$\frac{5}{\sqrt{3\sqrt{3}}} \sqrt{nS}$
ドローネ網 DT			$\frac{5 + 2\sqrt{3}}{\sqrt{3\sqrt{3}}} \sqrt{nS}$

表 2.3: 規則的格子とランダム点における各グラフの平均辺長

	三角格子点	正方格子点	六角格子点	ランダム点
孤立最近接対 RP	$\sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}}} \sqrt{\frac{S}{n}}$	$\sqrt{\frac{S}{n}}$	$\frac{2}{\sqrt{3\sqrt{3}}} \sqrt{\frac{S}{n}}$	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{4\pi/3 + \sqrt{3}/2}} \sqrt{\frac{S}{n}}$
最近傍グラフ NNG				$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{S}{n}}$
最小木 MST				$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\pi/3 + \sqrt{3}/2}} \sqrt{\frac{S}{n}}$
相対近傍グラフ RNG				$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{2\pi/3 - \sqrt{3}/2}} \sqrt{\frac{S}{n}}$
ガブリエルグラフ GG		$\frac{2 + \sqrt{2}}{3} \sqrt{\frac{S}{n}}$	$\frac{5}{2\sqrt{3\sqrt{3}}} \sqrt{\frac{S}{n}}$	$\sqrt{\frac{S}{n}}$
ドローネ網 DT			$\frac{5 + 2\sqrt{3}}{3\sqrt{3\sqrt{3}}} \sqrt{\frac{S}{n}}$	$\frac{32}{9\pi} \sqrt{\frac{S}{n}}$

2.4 グラフ上の移動距離

本節では、局所的な近さという視点で構築された近接グラフが、そのネットワーク上での移動とどのような関係にあるのかを分析する。

都市モデルにおいて、二点間を直線で移動できる直線距離と直交距離をベースにした連続移動モデルが多く提案されてきた。それらとグラフ上の移動から見た評価を行い、ネットワーク移動と連続移動の性質の違いを考察できる。なお、辺に距離などの属性が与えられた場合、その辺の集合を「ネットワーク」と呼ぶ。

点が二次元平面においてランダムに分布しており、全ての点間に一様に発生する需要がネットワーク上を移動する場合、移動の評価指標として、下記の二つの指標の分布と期待値を導出し、理論的距離とネットワーク距離との比較を行う。

- 移動距離：移動の利便性
- 直線距離との比：移動の効率性

そして、各種近接グラフの交通網整備長と移動利便性の関係を考察する。

2.4.1 移動距離の算出

ある二点間を移動するとき、図 2.8 のような下記の三つの経路パターンを考える。

- 直線距離 u ：二点間を直線で移動する距離（Euclid 距離）
- 直交距離 r ：二点間をある直交した座標軸で移動する距離（Rectilinear 距離，Manhattan 距離）
- ネットワーク距離 d ：二点間を結ぶネットワーク上を最短経路で移動する距離

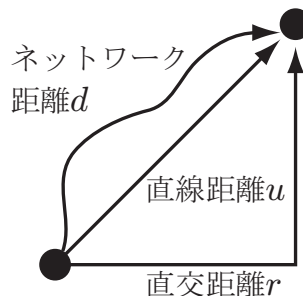


図 2.8: 移動距離の計測方法

第2章 点間の近接性によって構築されるグラフの性質

理論的距離の定義

理論的距離である直線距離 u , 直交距離 r について , 二点間 $p_i = (x_i, y_i)$, $p_j = (x_j, y_j)$ の移動距離はそれぞれ

$$u \stackrel{def}{=} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2.4.1)$$

$$r \stackrel{def}{=} |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (2.4.2)$$

と定義する .

ネットワーク距離の定義

ネットワーク距離 d は , 点集合 P , 辺集合 E として , 無向グラフ $G = (P, E)$ の上を移動する . その際 , グラフ G が連結グラフであるとき , 二点間には路 (paths) があり , 二点 i, j 間の最短距離とする .

ネットワーク距離の算出について , 数値実験を行う . 正方形領域 (一辺 a , 面積 $S = a^2$) に , 需要点 (点数 n , 密度 $\rho = n/S$) が一様にランダムに分布する . 交通需要は , 全点から全点に向けて一様な需要が発生し , その総数は $n(n-1)$ となる .

需要点間を結ぶ近接グラフをネットワークとして構築する . その際 , 各辺の長さ d_{ij} は , P_i, P_j 点間のネットワーク上を移動する最短距離とする . 下記の近接グラフと最小木を対象として , そのネットワーク上を移動する場合における全点間の最短距離を導出する . この際 , 最短経路問題のアルゴリズムとして , Dijkstra 法 ([久保, 田村, 松井 (2002)]) を用いる .

- 最小木 (Minimum Spanning Tree: MST)
- 相対近傍グラフ (Relative Neighborhood Graph: RNG)
- ガブリエルグラフ (Gabriel Graph: GG)
- ドローネ網 (Delaunay Triangle: DT)

2.4.2 移動距離による比較

理論的距離に関する理論式

距離分布とは , 二点間の距離 l の確率密度関数 $f(l)$ を示す .

正方形領域 (一辺 a) において , 一様かつ独立に分布する移動の起終点があるとき , 移動需要はあらゆる 2 点間で等しい頻度で発生集中する .

直線距離 u で移動する場合の密度関数 $f_U(u)$ は, [Ghosh(1951), 腰塚 (1978a)] で矩形領域について導出されており,

$$f_U(u) = \begin{cases} \frac{2u}{a^4}(a^2\pi - 4au + u^2) & (0 \leq u \leq a) \\ \frac{2u}{a^4} \left\{ 2a^2 \left(\arcsin \frac{a}{u} - \arccos \frac{a}{u} \right) + 4a\sqrt{u^2 - a^2} - (u^2 + 2a^2) \right\} & (a < u \leq \sqrt{2}a) \end{cases} \quad (2.4.3)$$

となる. これより, 期待値は,

$$\mu_U = \left\{ \frac{1}{15}(2 + \sqrt{2}) + \frac{1}{3}\log(1 + \sqrt{2}) \right\} a \quad (2.4.4)$$

$$\simeq 0.521a \quad (2.4.5)$$

となる.

一方, 直交距離 r の場合は, [Fairthorne(1963)], [腰塚 (1996)] において矩形領域について導出されており,

$$f_R(r) = \begin{cases} \frac{2r}{a^4} \left(\frac{r^2}{3} - 2ar + 2a^2 \right) & (0 \leq r \leq a) \\ \frac{2}{3a^4}(2a - r)^3 & (a < r \leq 2a) \end{cases} \quad (2.4.6)$$

となる. これより, 期待値は,

$$\mu_R = \frac{2}{3}a \quad (2.4.7)$$

$$\simeq 0.667a \quad (2.4.8)$$

となる.

近接グラフ上の移動との比較

正方形領域 (一辺 $a = 10^6$) に, 需要点 (点数 $n = 1000$) が一様にランダムに分布する場合について, 10 パターンの点分布を用いて数値実験を行う.

移動距離分布 (10 パターンの平均) を, 直線距離と直交距離の各理論的分布と比較する. 距離分布はそれぞれ, 相対近傍グラフは図 2.9, ガブリエルグラフは図 2.10, ドローネ網は図 2.11 の棒グラフのようになり, 下向きの三角がその平均値 \bar{d} である. また, 直線距離と直交距離の距離分布は実線で表されており, その平均値 μ は縦棒で表されており, 直線距離 μ_U の方が直交距離 μ_V よりも短くなっている.

図 2.9 より, 相対近傍グラフは直交距離の理論的分布と形状がかなり近い. 平均値も表 2.4 からほぼ等しい. 図 2.11 より, ドローネ網が直線距離の理論的分布と形状がかなり近いことが分かる. 平均値も表 2.4 からかなり近いと言える. 図 2.10 より, ガブリエルグラフは両理論的分布の中間的な形状であり, 平均値も表 2.4 から中間にあることが分かる.

第2章 点間の近接性によって構築されるグラフの性質

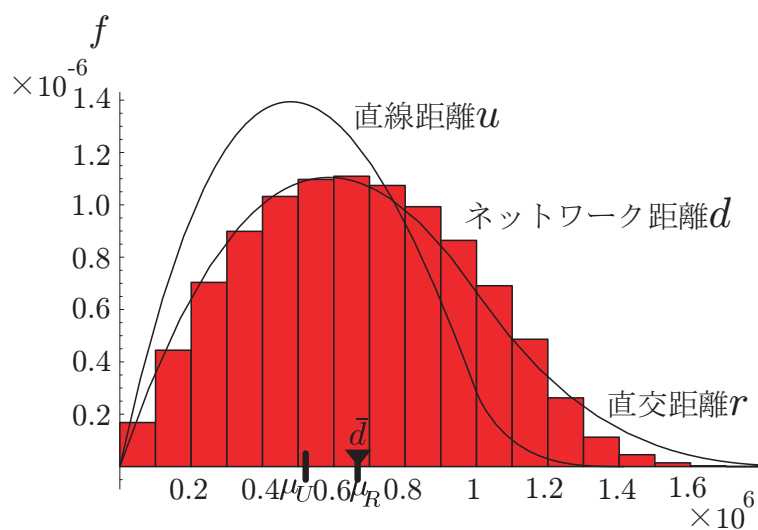


図 2.9: 移動距離分布 (相対近傍グラフ RNG)

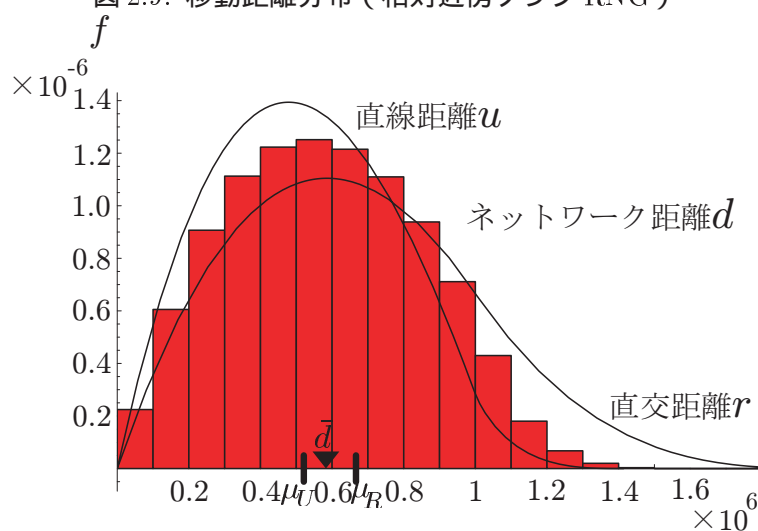


図 2.10: 移動距離分布 (ガブリエルグラフ GG)

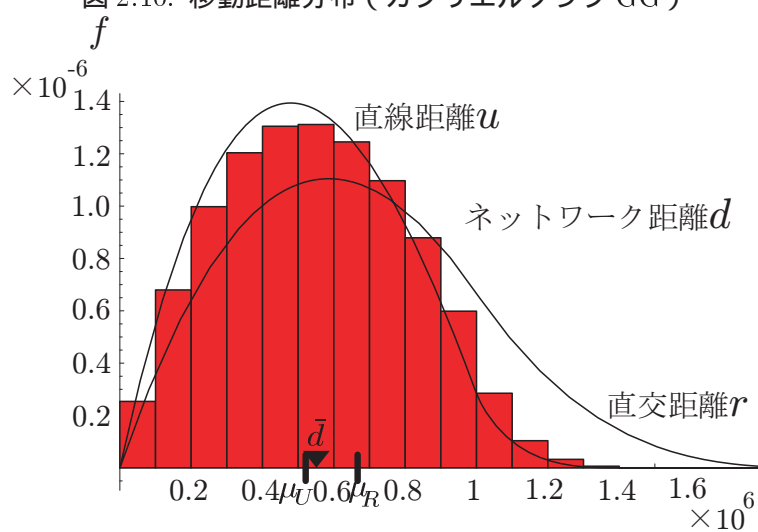


図 2.11: 移動距離分布 (ドローネ網 DT)

表 2.4: 移動距離の平均

	平均値
直線距離	0.521
直交距離	0.667
相対近傍グラフ RNG	0.668
ガブリエルグラフ GG	0.583
ドローネ網 DT	0.551

2.4.3 直線距離との比による比較

理論的距離に関する理論式

直線距離 u に対する直交距離 r の比 h は ,

$$\begin{aligned} h &= \frac{r}{u} \\ &= \frac{|x_i - x_j| + |y_i - y_j|}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} \quad (1 \leq r \leq \sqrt{2}) \end{aligned} \quad (2.4.9)$$

と定義できる .

正方形領域において , 比の密度関数は , [小林 (1983)] において

$$f_H(h) = \frac{8(h + 3\sqrt{2 - h^2})}{3(h + \sqrt{2 - h^2})^3 \sqrt{2 - h^2}} \quad (2.4.10)$$

と導出されている . これより比の期待値は ,

$$\begin{aligned} \mu_H &= \int_1^{\sqrt{2}} h f_H(h) dh \\ &= \frac{1}{3} \left\{ 5 \log(1 + \sqrt{2}) + \sqrt{2}(1 - \sqrt{2}) \right\} \\ &\simeq 1.274 \end{aligned}$$

と求まる .

そして , 直線距離 u_{ij} に対するネットワーク距離 d_{ij} の比 k は , 各移動ペアでの比の総和を導出し , 全移動ペア数で除することにより ,

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{d_{ij}}{u_{ij}}}{n(n-1)/2} \quad (2.4.11)$$

と定義できる .

一方 , 移動の総量から見ると , [Vaughan(1987)] で定義されている移動距離の平均を直線距離の平均で除した値を , 「Route Factor(以下 , RF)」として ,

$$\text{RF} = \frac{\text{平均距離 (ネットワーク距離)}}{\text{平均距離 (直線距離)}} \quad (2.4.12)$$

第2章 点間の近接性によって構築されるグラフの性質

と定義している．直交距離の RF を算出すると，

$$\begin{aligned} \text{RF}_R &= \frac{\mu_R}{\mu_U} \\ &= \frac{\frac{2}{3}a}{\left\{\frac{1}{15}(2 + \sqrt{2}) + \frac{1}{3}\log(1 + \sqrt{2})\right\}a} \\ &\simeq 1.279 \end{aligned}$$

となり，比の期待値の関係は， $\text{RF}_R \neq \mu_H$ であるが数値は非常に近いことが分かる．

そして，ネットワーク距離の RF を算出すると，直線距離もネットワーク距離でも移動需要の総和は変わらないため通分することができ，

$$\text{RF}_D = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n d_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n u_{ij}} \quad (2.4.13)$$

となる．

近接グラフ上の移動との比較

直線距離との比（10 パターンの平均）に関してまとめると，表 2.5 のようになる．直交距離及び3つの近接グラフにおいて，評価指標として比の平均値と RF には大きな差が見られない．そして，比の平均と RF の両方において，直交距離と相対近傍グラフの値がかなり近いことが分かる．つまり，移動の効率性から見ても，格子状道路と相対近傍グラフの性質が近いことが分かった．

比の最大値を比較すると，直行距離はガブリエルグラフとドローネ網の間にある．相対近傍グラフからガブリエルグラフで約2倍の違いがあり，最大値の性質は平均値と大きく異なることが分かる．

一方，比の分布を見ると，ドローネ網の場合は図 2.14，ガブリエルグラフの場合は図 2.13，相対近傍グラフの場合は図 2.12 のそれぞれ棒グラフのようになり，下向きの三角がその平均値である．また，直交距離は実線で表されており，その平均値は縦棒で表されている．それぞれ直交距離と比較すると，直交距離は $\sqrt{2}$ に向けて発散する一方，各近接グラフの分布形状は大きく異なることが分かる．

特に，移動距離で大きな類似性が見られた直交距離と相対近傍グラフとの比較を行うと，相対近傍グラフは 1.3 付近にピークがあるように二つは分布形状は大きく異なる．つまり，直線距離との比から見ると，直交距離と相対近傍グラフの性質は異なることが分かった．

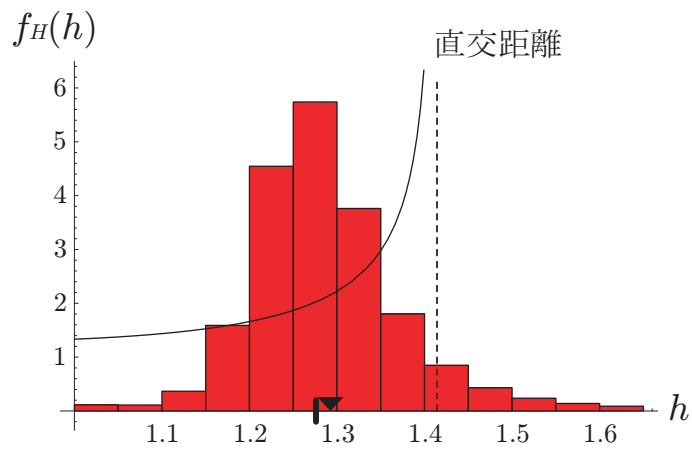


図 2.12: 直線距離との比の分布 (相対近傍グラフ RNG)

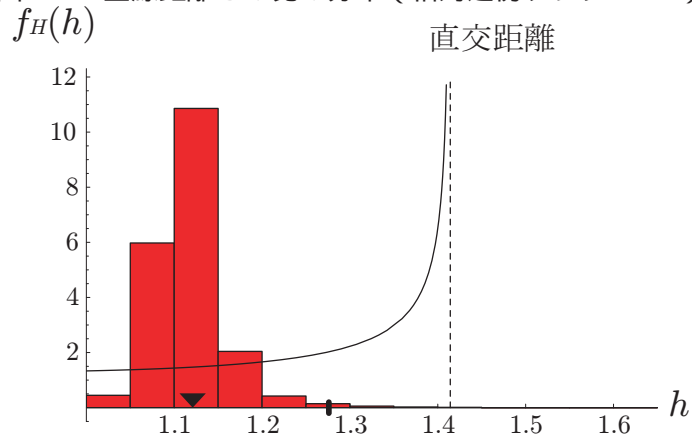


図 2.13: 直線距離との比の分布 (ガブリエルグラフ GG)

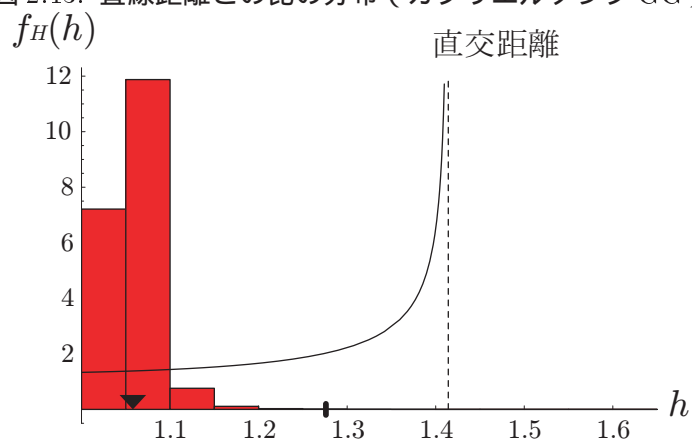


図 2.14: 直線距離との比の分布 (ドローネ網 DT)

第2章 点間の近接性によって構築されるグラフの性質

表 2.5: 直線距離との比

	最大値	平均値	RF
直交距離	1.414	1.274	1.279
相対近傍グラフ RNG	4.143	1.293	1.280
ガブリエルグラフ GG	1.987	1.121	1.116
ドローネ網 DT	1.402	1.058	1.056

2.4.4 総延長と総移動距離の関係

構築したグラフの総延長 L と総移動距離 D の関係を、点分布のパターン（E1k0 から E1k9 までの 10 パターン）ごとにプロットすると、図 2.15 のようになる。

実験に用いたそれぞれの点分布による影響については、最小木において移動距離に大きな差が見られる一方、近接グラフにおいてはそれほど大きな違いが見られない。

最小木からドローネ網へと構築される辺の総延長が長くなるほど、総移動距離は減少する。最小木から相対近傍グラフへと 1.5 倍の長さになると、総移動距離が約 6 割近く減少する。

相対近傍グラフからガブリエルグラフへ約 2 倍の長さになると、総移動距離 D は 13% 減少する。一方、ガブリエルグラフからドローネ網へ約 2 倍の長さになっても、総移動距離 D は 5% 程度しか減少しない。直交距離に値の近い相対近傍グラフから、直線距離に近いドローネ網まで延ばすとなると、ネットワーク長で約 4 倍必要である。

つまり、交通網の整備効果は、全ての点が最小の長さで結ばれている状態からある程度連結されたグラフに成長するまでの延ばす過程において、移動距離の削減効果が大きい。そして、ある程度密なネットワークになると整備長が長くなるほど、その移動距離の削減効果は逓減することが明らかになった。

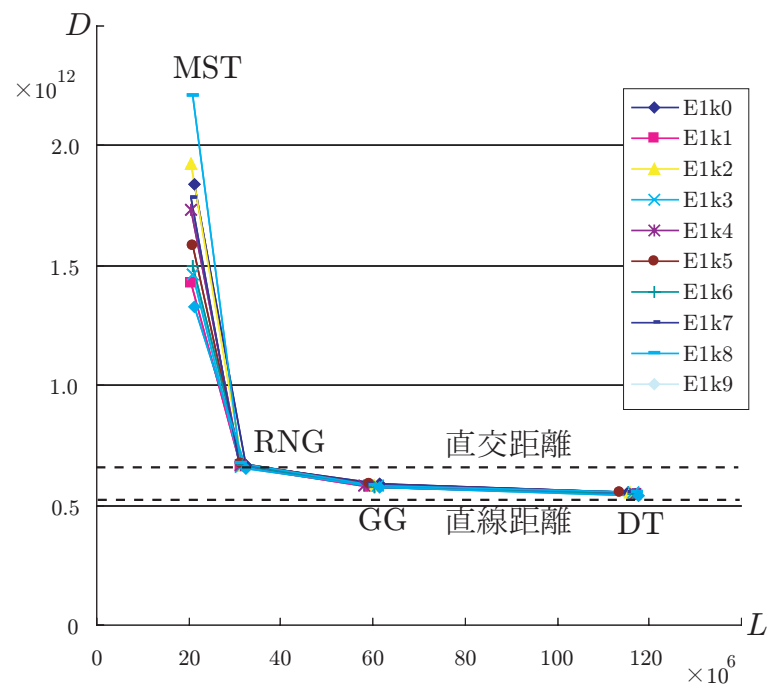


図 2.15: 近接グラフの総延長と総移動距離

2.5 まとめ

本章では、都市内の各種ネットワークを点と線で模式的に表すために、グラフとして定義し、点の近接性により線を生成する各種近接グラフを構築する方法をまとめた。近接グラフと関連したグラフの形態的特徴を比較するために、構築された辺の長さ和本数に関して考察を行った。グラフ上の移動距離について移動距離分布と直線距離との比について、既存の直線距離と直交距離による連続移動モデルによって得られた結果との比較を行った。

その結果、下記のことが明らかになった。

- 近接グラフの構築における点の探索領域の違いにより、新たに相対近傍グラフと最小木の辺の長さを推定し、最近傍グラフとドローネ網の中間の辺の長さとなる。そして、孤立最近接対 (RP) からドローネ網 (DT) へと近接性から見た点の探索領域が狭くなるにつれて、長い辺が増える。
- 移動距離分布に関して、ランダム点における相対近傍グラフ (RNG) は、格子状道路網を表す直交距離の理論的な距離分布及び平均値ともかなり近い。しかし、直線距離との比に関しては、比の平均については格子状道路と相対近傍グラフの性質に近いが、比の分布に関しては、近接グラフと理論式の結果は大きく異なる。
- グラフの総延長と移動距離の関係に関して、最小木 (MST) から相対近傍グラフ (RNG) へと延長が長くほど移動距離は急減するが、ガブリエルグラフ (GG) とドローネ網 (DT) へとさらに長くなっても距離の減少量は逡減となる。また、理論的距離とグラフの比較により、直交距離に値に近い相対近傍グラフから、直線距離に値に近いドローネ網と同じ移動距離の利便性へ近づくためには、相対近傍グラフの4倍程度の長さが必要である。

本節では、交通網の形成について近接性という基本的なモデルを構築したため、現実の都市で考える場合にはモデルの拡張が必要となる。

本モデルでは、あらかじめ点が与えられた場合に、その点間を交通網で結ぶモデルである。しかし、街道沿いの宿場町のように、交通路の途中に新たな集落が形成されることもある。また、交通網の発展によって利便性が向上するのに伴い、都市の階層構造が形成されることもある ([Christaller(1933)])。よって、人口などの規模の違いにより、点ごとに近接グラフの種類を変更することによって、形成されるグラフ形態の違いを考察することも考えられる。

点分布がランダムである場合を考えたが、集塊や分散など異なる点分布での移動利便性の違いについて考察することもできる。さらに、交通需要の設定において一様な需要を仮定したが、一様でない場合や距離減衰する場合と比較する必要がある。

第3章 交差点間の近接性に着目した都市内道路網形態の解析

3.1 はじめに

前章では、点間の近接性によって構築されるグラフについて、ランダムな点という理論的な状況における本数や長さといった形態的性質と近接グラフ上を移動する利便性の考察を行った。本章では近接グラフの幾何学的な形態的性質に着目し、交通網として都市内道路網を取り上げ、現実の都市空間における複雑な道路網形態の分析への応用を試みる。

都市における道路網と交差点は、各都市の地形や歴史などの固有の条件の下で、都市の骨組として長年の様々なアクティビティの積み重ねによって形成されてきた。道路網の配置は、本来の目的である円滑な交通だけでなく、街区の構成と市街化の誘導などの機能を有しており、総合的な都市計画のもとに決定される必要がある。

日本の都市では、京都や札幌などの計画都市や、区画整理などによる計画市街地においては格子状道路パターンが見られるが、多くの非計画市街地では規則的道路パターンを有していない。このように日本の都市は、空間が常に変化する可能性を持っている空間性質の未決定性（[都市デザイン研究体（1968）]）が特徴として見られ、欧米都市に見られる計画都市のような全体を統一した構築原理を把握することは非常に困難であることが分かる。

一方、都市計画において、主に欧米都市に見られる正方格子や三角格子、六角格子などの規則的道路が模式的道路網形態として紹介されている（[土井、川上、他（1981）]）。[都市問題研究会（1981）]において、表3.1のように日本における望ましい道路密度（面積当り道路延長）及び配置形態が道路の機能ごとに提案されている。その中で、住居系地域においては正方格子状道路網を仮定して配置間隔より整備水準（道路密度）を導出しているが、他の地域については配置パターンが明確でない上に導出の根拠が明確でない。

道路網の整備水準の議論において、密度に関する指標では道路の量について議論できても、形態的特性までは考慮することはできない。そのため、点と線の連結関係によって道路網形態を評価する研究が、次節で説明するようにこれまで多くなされてきた。これらの形態指標は対象地区全体として算出し地区間比較をすることができるが、地区内での道路網について評価することができない。

また、表3.1の配置パターンにおいて、住居系地域においては格子状道路が形態として望ま

第3章 交差点間の近接性に着目した都市内道路網形態の解析

表 3.1: 整備水準と配置パターン

道路種別	整備水準	配置パターン
都市高速道路	各都市圏の実情を考慮して設定する。	大都市圏：放射環状，地方中枢都市圏：放射または放射環状
主要幹線道路	上記を含めて $0.7\text{km}/\text{km}^2$	放射環状
幹線道路および 補助幹線道路	住居系地域： $4.0\text{km}/\text{km}^2$	格子状
	商業系地域： $5 \sim 7\text{km}/\text{km}^2$	規定なし
	工業系地域： $1 \sim 2\text{km}/\text{km}^2$	規定なし
	準工業地域：住居系と同水準	規定なし
	全体： $3.5\text{km}/\text{km}^2$ （道路面積率：7～8%）	規定なし
区画道路	$20\text{km}/\text{km}^2$ （道路面積率：12～14%）	規定なし
歩行者空間等	$4.0\text{km}/\text{km}^2$	規定なし

表 3.2: 街路パターンの分類

	街路パターンの幾何形状			
	グリッド型	円形型	ループ型	ツリー型
車社会非想定型	耕地整理型	理想都市型		平地スプール型
	短冊型			丘陵スプール型
車社会想定型	区画整理グリッド型			スプール改良型
車社会対応型	グリッド変形型		丘陵 TU 型	
車社会調和型	ショートカット緑道型		ラドバーン TU 型	
	ラドバーングリッド型		ラドバーン丘陵型	

しいとしている．そして，住区内の街路形態について考察した [小場瀬 (1989)] において，幾何学的形態や通過交通の対処，幅員構成，歩行者道路の有無により，表 3.2 のように街路パターンを詳細に分類している．このとき，幾何学的形態においてグリッド型のような格子状道路を判定する場合，分析者の目視による以外に客観的な指標が必要となる．

そこで，道路網形態の評価のために，交差点間の近接性によって各道路が連結されているという仮説を立て，2 章で考察した近接グラフと関連したグラフにより，グラフ辺と現実の道路網の比較により道路網の一本一本の構築原理を把握し，格子状道路などの規則的道路網との比較を行う．

本章は下記のように構成される．まず，3.2 節では，用いるグラフや既存の形態指標，使用

するデータの説明を行う．3.3 節では，規則的な点分布におけるグラフと各種の規則的道路網との関係を明らかにした上で，道路網形態を評価する指標を用いて，国内主要都市の道路網と比較する．3.4 節では，各都市の道路網データにより各種グラフを構築し，道路網とグラフの一致する辺の性質について考察を行う．さらに，一致する辺の数を構成比率として定義し，構成比率を用いて各都市間比較を行い，形態指標との関係を確認する．3.5 節では，規則的道路網が整備されている米国主要都市について同様の分析を行い，形態的性質の考察を行う．

3.2 研究の方法

本節では，前節で分析した近接性に関するグラフの定義など，次節以降の分析のための準備を行う．そして，既存研究で提案されている形態指標の紹介を行い，分析で用いる地図データの説明を行う．

3.2.1 近接性に関するグラフ

道路網を点と線の連結関係で表現する際には，グラフ理論が用いられ，2.2.1 節と同様に下記のように定義する．

面積 S の領域に，点数 n ，辺数 m ，成分数 p である総延長 L の道路があるとする．

グラフは，点の集合 $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ ，点に接続する辺の集合 $E = \{e_1, \dots, e_m\}$ の組であり， $G = (P, E)$ で表す．点の総数を n ，辺の総数を m とする．点の総数は $|P| = n$ ，辺の総数は $|E| = m$ という関係がある．

道路網を構成している点（基本的には，交差点）を「道路点」と呼ぶこととする．そして，道なりに結ばれている道路網に対して，両端の道路点間を直線距離で結んだ辺を「道路辺」と呼ぶこととする．そして道路網（Road Network：RN）は，道路点 P と道路辺 E_{RN} で構成されるグラフ $G_{RN} = (P, E_{RN})$ と表し，一般的な表記として名前が PG である近接グラフは $G_{PG} = (P, E_{PG})$ と表す．

本節で用いる近接性に関するグラフは，以下のような 2.2.2 節にて定義した 4 種類の近接グラフ，及び近接グラフに関係の深い最小木と完全グラフを用いる．

1. 孤立最近接対 (Reciprocal Pairs, RP)
2. 最近傍グラフ (Nearest Neighborhood Graph, NNG)
3. 最小木 (Minimum Spanning Tree, MST)
4. 相対近傍グラフ (Relative Neighborhood Graph, RNG)
5. ガブリエルグラフ (Gabriel Graph, GG)

第3章 交差点間の近接性に着目した都市内道路網形態の解析

6. ドローネ網 (Delaunay Triangle, DT)

7. 完全グラフ (Complete Graph, CG)

3.2.2 道路網の形態指標

既存研究において、道路網の形態を評価するための指標が、1.2 節のように多数提案されている。ここでは、グラフ理論を元にした道路網における点数と辺数の関係を扱った結合性に関する指標、ランダムラインモデルにおける頂点数と道路延長の関係を扱った道路密度に関する指標、ネットワークコンストラクションモデルにおける構成比率について紹介を行う。

こうした整備水準における密度や点と線の連結関係によって道路網形態を評価する研究では、形態指標は対象地区全体として算出し地区間比較をすることができ、地区内での道路網について評価することができない。

一方、後者のネットワークコンストラクションモデルは、道路交差点などを母点として各種グラフを構築することにより、道路網一本一本の構築原理について把握することができる。

結合性に関する指標：Grid-Tree Proportion(GTP)

道路の本数と交差点数の関係という結合性について、計量地理学において様々な指標が提案されている（[Taaffe, Gauthier, O'Kelly(1996)]）。交通網が平面グラフで構成されていると仮定した時、極大平面グラフにおける辺数は $3(n - 2)$ 本であるので、

$$\mu = m - n + p \quad (3.2.1)$$

$$\alpha = \frac{m - n + p}{2n - 5} \quad (3.2.2)$$

$$\beta = \frac{m}{n} \quad (3.2.3)$$

$$\gamma = \frac{m}{3(n - 2)} \quad (3.2.4)$$

のようになる。

各指標について本章との関係を見ると、 μ 指数は辺によって分割される街区数、 α 指数は極大平面グラフの街区数に対する比率、 β 指数は各交差点に接続されている道路の本数（平均次数）、 γ 指数は極大平面グラフの辺本数に対する比率と言える。

正方格子状道路網との関係を評価するため結合性に関する指標を拡張して、[野田(1996)]において「GTP(Grid-Tree Proportion)」が定義されている。上記の4つの指標の一般的表記を Index としたときに、正方格子(Grid)の場合の指標を $\text{Index}_{\text{Grid}}$ 、木(Tree)の場合を $\text{Index}_{\text{Tree}}$

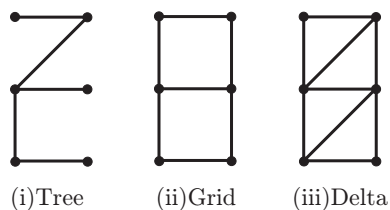


図 3.1: 模式的交通網

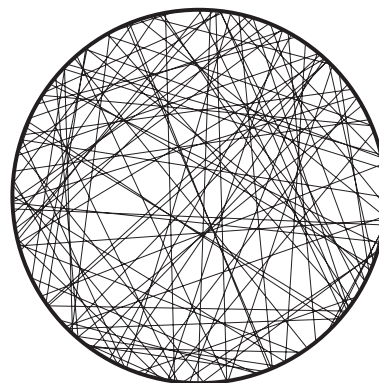


図 3.2: ランダムな直線 (100 本)

表 3.3: 模式的交通網における各指標

	(i)Tree	(ii)Grid	(iii)Delta
α	0	$\frac{1}{2}$	1
β	1	2	3
γ	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	1
GTP	0	1	2

とする．そのとき GTP は，各ネットワークについての点数 n ，辺数 m ，成分数 p を用いて，

$$\begin{aligned}
 \text{GTP} &= \frac{\text{Index} - \text{Index}_{\text{Tree}}}{\text{Index}_{\text{Grid}} - \text{Index}_{\text{Tree}}} \\
 &= \frac{m - n + p}{(\sqrt{n} - 1)^2}
 \end{aligned} \tag{3.2.5}$$

となり，最終的には 4 つの指標について同じ式に帰着する．

図 3.1 (出典：[石水, 奥野 (1973)]) の模式的交通網について各指標を算出すると，表 3.3 のようになる．GTP は木において 0，格子において 1 のように基準化されており，先に紹介した 4 つの指標と比べて比較しやすいことが分かる．

しかし，この指標では点数 n や辺数 m のみを利用するため，道路延長 L や領域面積 S を考慮することができない．

道路密度に関する指標：Crossing Factor(CF)

道路の総延長と交差点数の関係について，図 3.2 のような（一様に）ランダムな直線を道路網と見なして，主に積分幾何学を用いたランダムラインモデルによる研究が行われてきた．

[腰塚 (1978a)] では，Crofton の公式を用いて，ランダムな直線における交点数の期待値を導

第3章 交差点間の近接性に着目した都市内道路網形態の解析

出し，

$$L = \alpha \sqrt{n\pi S} \quad (3.2.6)$$

$$\propto \sqrt{nS} \quad (3.2.7)$$

という関係を示した．これは，道路延長が交差点数と面積の積の平方根に比例することから，「ルート N の法則」と呼ばれている．

この関係を元に [Vaughan(1987)] では，「Crossing Factor」(以下，CF) として，

$$\begin{aligned} \text{CF} &= \frac{\text{density of crossings}}{(\text{density of road})^2} \\ &= \frac{nS}{L^2} \end{aligned} \quad (3.2.8)$$

と定義される．

この指標は，交差点密度 (n/S) と道路密度 (L/S) を用いていることから領域面積を考慮しているが，GTP で扱っていた道路の辺数 m が考慮されていない．

構成比率

ネットワークコンストラクションモデルでは，道路交差点などを母点として各種グラフを構築し，実際の交通網の形態的特性を評価している．

[谷村, 古山 (2001)]，[谷村, 古山 (2003)] では，英国の都市における街路網を対象として，最小木・最短巡回路・外延木・ドローネ網などのグラフを構築して，道路網と重なる辺の割合から最適性や合理性を評価している．その際，評価指標として「ヒット率」が定義されている．

本研究では，道路辺とグラフ辺との関係を評価するために，図 3.3 のように 3 種類の辺に分類して，下記の指標を定義する．各地区において，構築したグラフがどれだけ道路網と一致しているのかを評価する指標として，3 種類の構成比率を下記のように定義する．それぞれの指標において，グラフ辺と道路辺とが完全に一致する場合は 1 となる．

1. 道路構成比率 (Road edge Ratio, RR)：道路辺の本数に対するグラフ辺と道路辺との一致した本数の割合．道路辺に着目した指標で，グラフ辺が増加するほど一致辺の本数は増加するが不足辺は減少するため，RR は増加する．

$$\text{RR}_{\text{PG}} = \frac{|E_{\text{RN}} \cap E_{\text{PG}}|}{|E_{\text{RN}}|} \quad (3.2.9)$$

2. グラフ構成比率 (Graph edge Ratio, GR)：構築したグラフ辺の本数に対するグラフ辺と道路辺との一致した本数の割合．グラフ辺に着目した指標で，グラフ辺が増加するほ

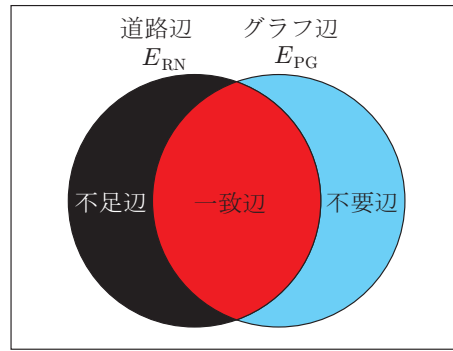


図 3.3: 道路辺とグラフ辺による構成比率

ど不要辺も一致辺も本数が増加するため，両者のバランスによって GR の値が変化する．つまり，説明できるかどうかを評価するのに適している．

$$GR_{PG} = \frac{|E_{RN} \cap E_{PG}|}{|E_{PG}|} \quad (3.2.10)$$

3. 総合構成比率 (Entire edge Ratio, ER)：道路辺と構築したグラフ辺の和集合の辺の本数に対するグラフ辺と道路辺との一致した本数の割合．道路辺とグラフ辺に着目した指標で，グラフ辺が増加するほど不足辺は減少する一方，一致辺と不要辺が増加するため，両者のバランスによって ER の値が変化する．

$$ER_{PG} = \frac{|E_{RN} \cap E_{PG}|}{|E_{RN} \cup E_{PG}|} \quad (3.2.11)$$

3.2.3 使用する地図データ

既存研究の多くでは，利用可能な地図データの制約から，公共機関によるデジタル地図データを利用しておらず，都市間を比較する上でのデータ精度に問題があると考えられる．日本における都市計画道路の計画策定においては，[都市計画道路計画標準策定委員会 (1974)] において 1:2500 程度の地形図を用いて検討を行うとされている．また，同一の地図情報レベルを有する数値地図データを用いることにより，統一された精度で広域的に比較分析を行うことができる．

そこで本研究では，「数値地図 2500(空間データ基盤)」(以下，数値地図 2500) を用いて，図 3.4 にある日本国内の主要都市を対象に実験を行う．この地図は，全国の都市計画区域を対象とした都市計画図を基にして，縮尺 1:2500 相当の地図情報レベルで作成されている．地図データの作成及び結果の詳細については，付録 A.1 にて説明する．

第3章 交差点間の近接性に着目した都市内道路網形態の解析

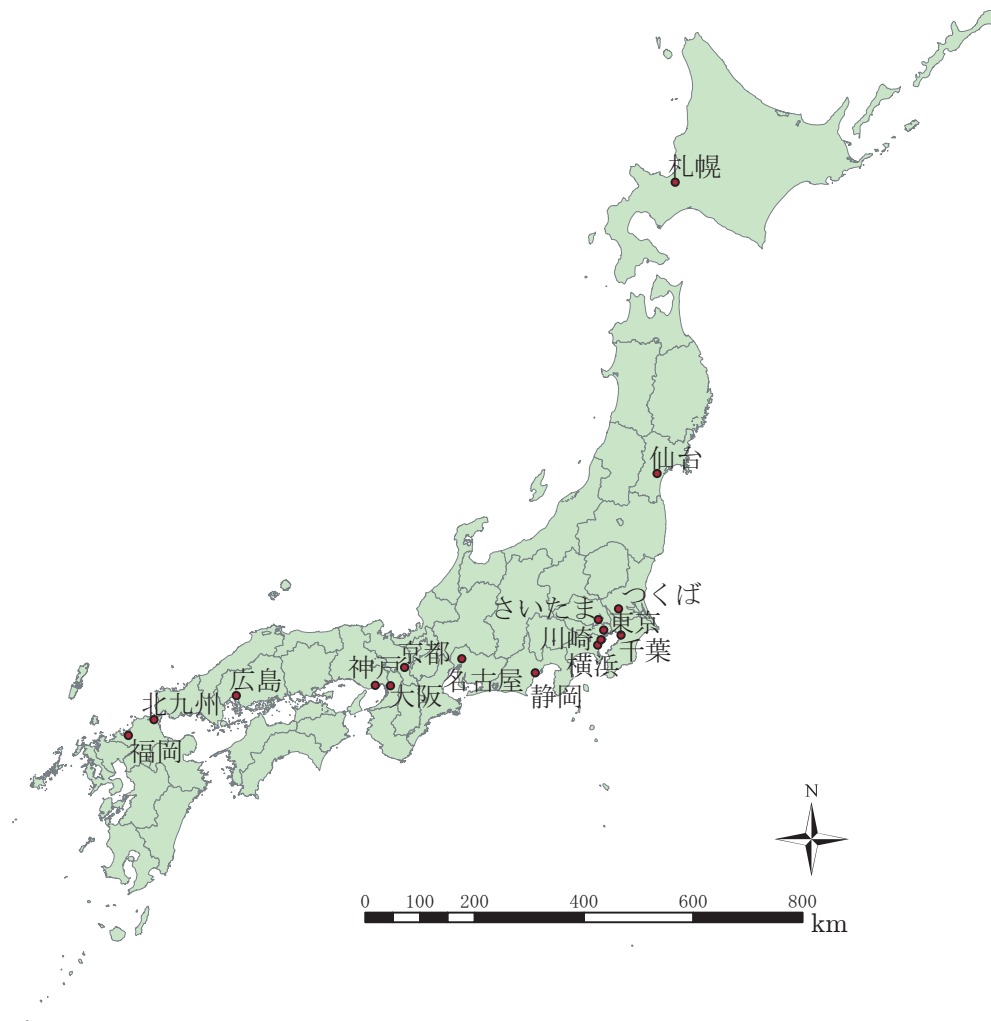


図 3.4: 対象地区

表 3.4: 対象地区の道路網データ

都市	地区	点数 (個)	辺数 (本)	道路延長 (m)	道路密度 (m/ha)	GTP	CF
東京	東京駅	3,128	4,885	273,541	228	0.562	0.502
	上野	5,026	8,013	365,540	305	0.595	0.451
	新宿	4,488	6,236	306,859	256	0.390	0.572
	渋谷	3,373	4,603	254,642	212	0.365	0.624
	池袋	6,451	8,986	373,898	312	0.393	0.554
札幌	大通	1,703	2,687	213,471	178	0.578	0.448
仙台	青葉通	1,842	2,534	192,632	161	0.376	0.596
さいたま	浦和	5,322	7,228	338,541	282	0.358	0.557
千葉	千葉駅	3,588	5,026	265,535	221	0.401	0.611
横浜	関内	3,437	5,012	261,526	218	0.459	0.603
川崎	川崎駅	3,646	5,172	272,917	227	0.419	0.587
静岡	駿府城	3,401	5,060	288,292	240	0.488	0.491
名古屋	栄	2,466	3,924	281,639	235	0.592	0.373
京都	下京	3,932	5,623	286,439	239	0.430	0.575
	上京	3,354	4,794	257,885	215	0.430	0.605
大阪	難波	3,362	5,208	313,028	261	0.549	0.412
	中之島	3,373	5,200	320,081	267	0.542	0.395
神戸	三宮	4,440	6,385	275,892	230	0.438	0.700
広島	平和大通	2,463	3,796	251,782	210	0.542	0.466
北九州	小倉	2,260	3,341	233,609	195	0.479	0.497
福岡	天神	3,236	4,808	289,719	241	0.486	0.463
つくば	つくばセンター	1,345	1,812	163,764	136	0.348	0.602

日本全国の主要都市として、東京都および政令指定都市（2005年4月1日現在）の中心地区、3.4.2節での近接性に関するグラフの説明に適切な道路網であるつくばセンター地区、計22地区を対象とする。各都市の中心地区として、各都市の役所や主要交通施設などを含む範囲（東西方向：4km，南北方向：3km， $S = 12\text{km}^2$ ）を用いて分析を行う。表3.4は、今回作成した対象地区の道路網データの概要である。

3.3 形態指標による道路網形態の評価

本節では，規則的道路網と現実の都市内道路網を対象に，前節で紹介した既存の形態指標を用いて比較を行う．そして都市間比較を行うことにより，各形態指標の持つ性質について考察を行う．

3.3.1 格子状道路網

規則的点分布として，下記の三種類を対象とする．

1. 三角格子点 (Triangular Lattice)
2. 正方格子点 (Square Lattice)
3. 六角格子点 (Hexagonal Lattice)

規則的点分布における近接グラフは，2.3.2 節で見たように図 3.5 のようになる．つまり，都市計画で代表的な道路網形態として用いられる規則的格子状道路網は，交差点が規則的分布に従っている場合の近接グラフで説明できることが分かる．

規則的格子の場合，辺長と辺数は交差点の密度に依存するため，近似的に算出することが可能である．点が一様に密に分布する場合，2.3.2 節より，辺の総本数は表 3.5，総辺長は表 3.6 のようにまとめられる．

	三角格子点	正方格子点	六角格子点
相対近傍グラフ (RNG)			
ガブリエルグラフ (GG)			
ドローネ網 (DT)			

図 3.5: 各規則的点分布における近接グラフ

3.3. 形態指標による道路網形態の評価

これより，GTP は式 (3.2.5) に代入することにより計算することができ，点数 n が十分大きいときについてその結果をまとめると表 3.7 のようになる．同種類のグラフであっても，点分布による値は MST 以外は異なるが，その値の違いは少ない．

同様に，CF は式 (3.2.8) に代入することにより計算することができ，その結果をまとめると表 3.8 のようになる．GTP と比べると，同種類のグラフでも点分布の違いによって大きく値が異なることが分かる．

表 3.5: 各規則的点分布におけるグラフの総辺数 m

	三角格子点	正方格子点	六角格子点
最小木 MST	$n - 1$	$n - 1$	$n - 1$
相対近傍グラフ RNG	$3n$	$2n$	$\frac{3}{2}n$
ガブリエルグラフ GG		$3n$	$2n$
ドローネ網 DT			$3n$

表 3.6: 各規則的点分布におけるグラフの総辺長 L

	三角格子点	正方格子点	六角格子点
最小木 MST	$\frac{(n-1)\sqrt{2S}}{\sqrt{\sqrt{3}n}}$	$\frac{(n-1)\sqrt{S}}{\sqrt{n}}$	$\frac{2(n-1)\sqrt{S}}{\sqrt{3\sqrt{3}n}}$
相対近傍グラフ RNG	$3\sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}}}\sqrt{nS}$	$2\sqrt{nS}$	$\sqrt{\frac{3}{\sqrt{3}}}\sqrt{nS}$
ガブリエルグラフ GG		$(2+\sqrt{2})\sqrt{nS}$	$\frac{5}{\sqrt{3\sqrt{3}}}\sqrt{nS}$
ドローネ網 DT			$\frac{5+2\sqrt{3}}{\sqrt{3\sqrt{3}}}\sqrt{nS}$

表 3.7: 各規則的点分布におけるグラフの GTP

	三角格子点	正方格子点	六角格子点
最小木 MST	0	0	0
相対近傍グラフ RNG	2	1	$\frac{1}{2}$
ガブリエルグラフ GG		2	1
ドローネ網 DT			2

表 3.8: 各規則的点分布におけるグラフの CF

	三角格子点	正方格子点	六角格子点
最小木 MST	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1	$\frac{3\sqrt{3}}{4}$
相対近傍グラフ RNG	$\frac{\sqrt{3}}{18}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}$
ガブリエルグラフ GG		$\frac{1}{(2+\sqrt{2})^2}$	$\frac{3\sqrt{3}}{25}$
ドローネ網 DT			$\frac{3\sqrt{3}}{(5+2\sqrt{3})^2}$

第3章 交差点間の近接性に着目した都市内道路網形態の解析

3.3.2 都市内道路網

3.2.3 節で説明した主要都市における道路網を用いて、GTP と CF の各指標により道路網形態を分析する。

点数と辺数の関係は図 3.6 のようになり、点数が増加するほど辺数は増加し、ほぼ線形の関係が見られる。各都市の GTP 値を表 3.4 の数値を用いて、式 (3.2.5) より導出すると、最大は「上野」(GTP=0.595)、最小は「つくば」(GTP=0.348) となった。

一方、点数と道路長の関係は図 3.7 のようになり、点数が増加するほど道路長は増加するが、道路長の増分は逓減している関係が見られる。このことより、このデータからもルート N の法則が見られる。各都市の CF 値を表 3.4 の数値を用いて、式 (3.2.8) より導出すると、最大は「神戸」(CF=0.707)、最小は「名古屋」(CF=0.373) となった。なお、神戸は海水面の面積が 12% と大きいため、他の地区よりも道路密度が低くなってしまう、密度において面積の扱いが重要であることがわかる。

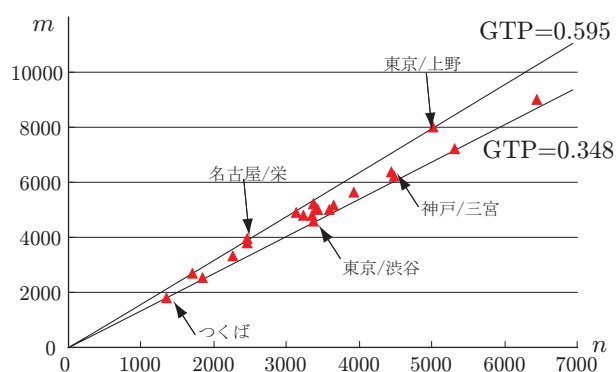


図 3.6: GTP 値による対象都市の点数と辺数の関係

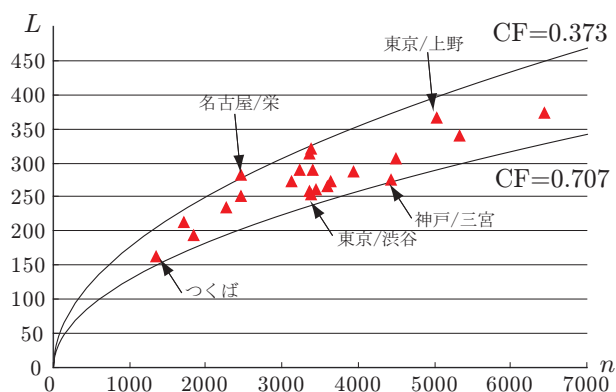


図 3.7: CF 値による対象都市の点数と道路長の関係

3.3.3 形態指標 GTP と CF の関係分析

結合性に関する形態指標 GTP と道路密度に関する形態指標 CF の関係について考察するために、それぞれの値を図 3.8 にプロットする。各格子状道路網については表 3.7 と表 3.8 の数値を、対象の都市道路網については表 3.4 の数値を用いる。

近接性に関するグラフについて、最小木 MST からドローネ網 DT へとネットワークが密になるほど、GTP 指標は増加する一方、CF 指標は減少する。GTP 指標において、式に長さに関する項がないため、同じ次数であるグラフでは点分布が違う場合でも同じ値になる。CF 指標において、MST では値に点分布間で大きな差が見られるが、ドローネ網 DT になるとほとんど差が見られない。各地区道路網の指標値を見ると、正方格子点における相対近傍グラフ（正方 RNG）と三角格子点における最小木（三角 MST）の中間程度である六角格子点における相対近傍グラフ（六角 RNG）に近い性質があることが分かる。

道路網について詳細に見るために、図 3.8 の一部を拡大したものをプロットすると、図 3.9 のようになる。六角格子点における相対近傍グラフ（六角 RNG）を境にして、右下側には道路網が密であり形態が格子状である地区（例えば、名古屋や札幌）が見られる。一方、左上側には道路網が疎である地区（例えば、渋谷やつくば）が見られる。

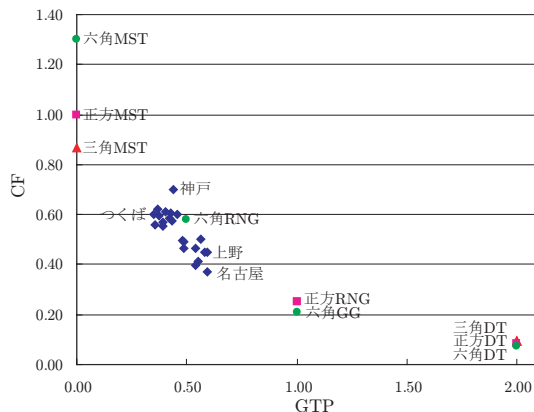


図 3.8: 各形態指標によるグラフと道路網の比較

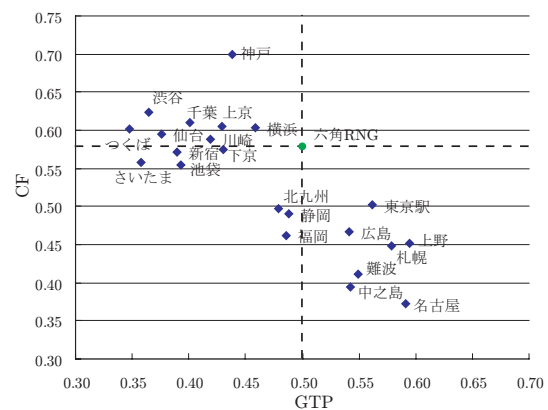


図 3.9: 各形態指標によるグラフと道路網の比較（拡大）

3.4 近接性に関するグラフによる都市内道路網の分析

本節では、都市内道路網における道路点において近接性に関するグラフを構築し、道路網形態の評価を行う。まず、構築したグラフ辺と道路網の重ね合わせによる比較により、道路網一本一本の構築原理を把握する。その結果を各種構成比率を用いて都市間比較を行い、前節で議論した既存の形態指標との関係について考察を行う。

3.4.1 近接グラフと最小木の構築

都市内道路網を用いて、2.2 節で説明した近接グラフと最小木を構築し、道路網と比較を行う。

本節では、図 3.10 のようなつくばセンター地区（茨城県つくば市）での分析を元に説明する。この地区の特徴としては、ニュータウンとして計画された中心のデザインされた道路網、住宅地の格子状道路網、河川や丘陵といった自然地形に依存した農村集落の不規則な道路網など、豊富な道路網パターンが見られる。このように様々なパターンの道路網が見られるため、各道路一本一本の構築原理を把握するのにふさわしいと考えられる。

道路網は道路点間を道なりの曲線で表現しているが、グラフは直線距離 (Euclidean Distance) に基づいた近接性により構築されているので、点間は直線である「道路辺」で結ばれているとする。道路網と道路辺を重ね合わせると図 3.11 のようになり、格子状道路ではほとんど重複しているが、旧集落や中心部での屈曲した道路では重複していない部分が多い。

3.2.1 節で定義した「道路点」は、本データにおいては交差点、属性変換点、行止り点、外周の図郭交点を示す。抽出した道路点は、図 3.12 のようになり、格子状道路網が整備されている箇所は道路点も規則的に並んでいる。

道路点を元に各種グラフを構築すると、図 3.13 のようになる。表 3.9 に各グラフの構築辺の総本数、表 3.10 に各グラフの構築辺の総延長をまとめる。孤立最近接対 RP においては、ごく近い点同士しか結ばれていないが、ドローネ網 DT へと近接性が変化するにつれて、構築される辺の本数が増えることが分かる。

道路辺とグラフ辺の一本一本の長さについて、辺長分布で比較を行う。辺長分布を見ると、図 3.14 のようになり、長い順にドローネ網 DT、ガブリエルグラフ GG、相対近傍グラフ RNG とすそが長くなっている。道路網も他と同じく 80m が最も頻度が高く、140m 以下までは相対近傍グラフ RNG に近く、それより長くなるとガブリエルグラフ GG に近い性質がある。

道路辺とグラフ辺の各道路点での接続関係について、次数分布で比較を行う。次数分布を見ると、図 3.15 のようになり、ネットワークが密になる程に、ドローネ網 DT、ガブリエルグラフ GG、相対近傍グラフ RNG とすそが長くなっている。道路網は次数 2 が極端に少なく、これらのほとんどは橋など交差点でない辺の途中で属性変更となる辺である。そして、次数 3 に大きなピークが見られ、近接グラフと異なり連続的な分布が見られない。

3.4. 近接性に関するグラフによる都市内道路網の分析

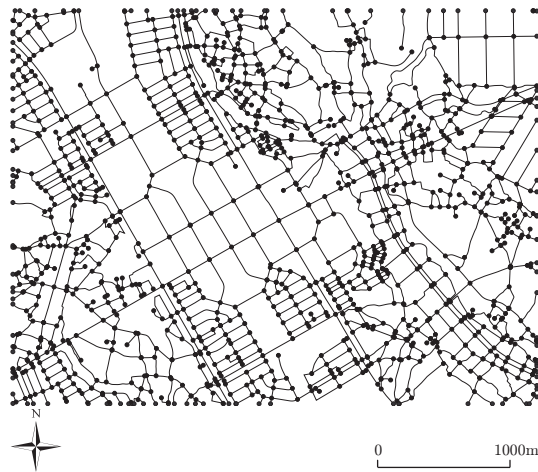


図 3.10: 道路網（つくばセンター地区）

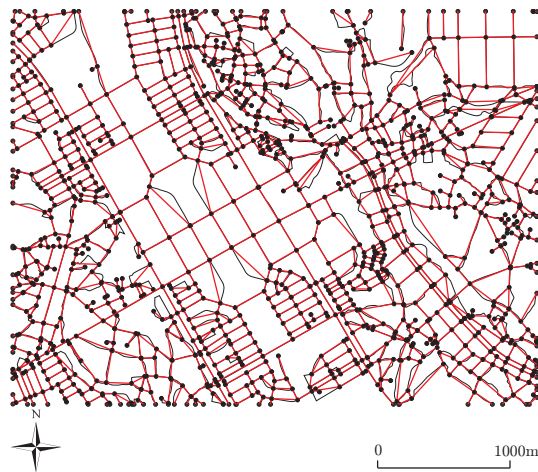


図 3.11: 道路網と道路辺（つくばセンター地区）

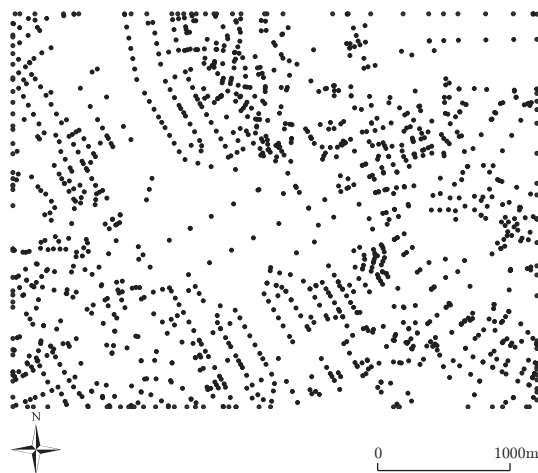


図 3.12: 道路点の抽出（つくばセンター地区）

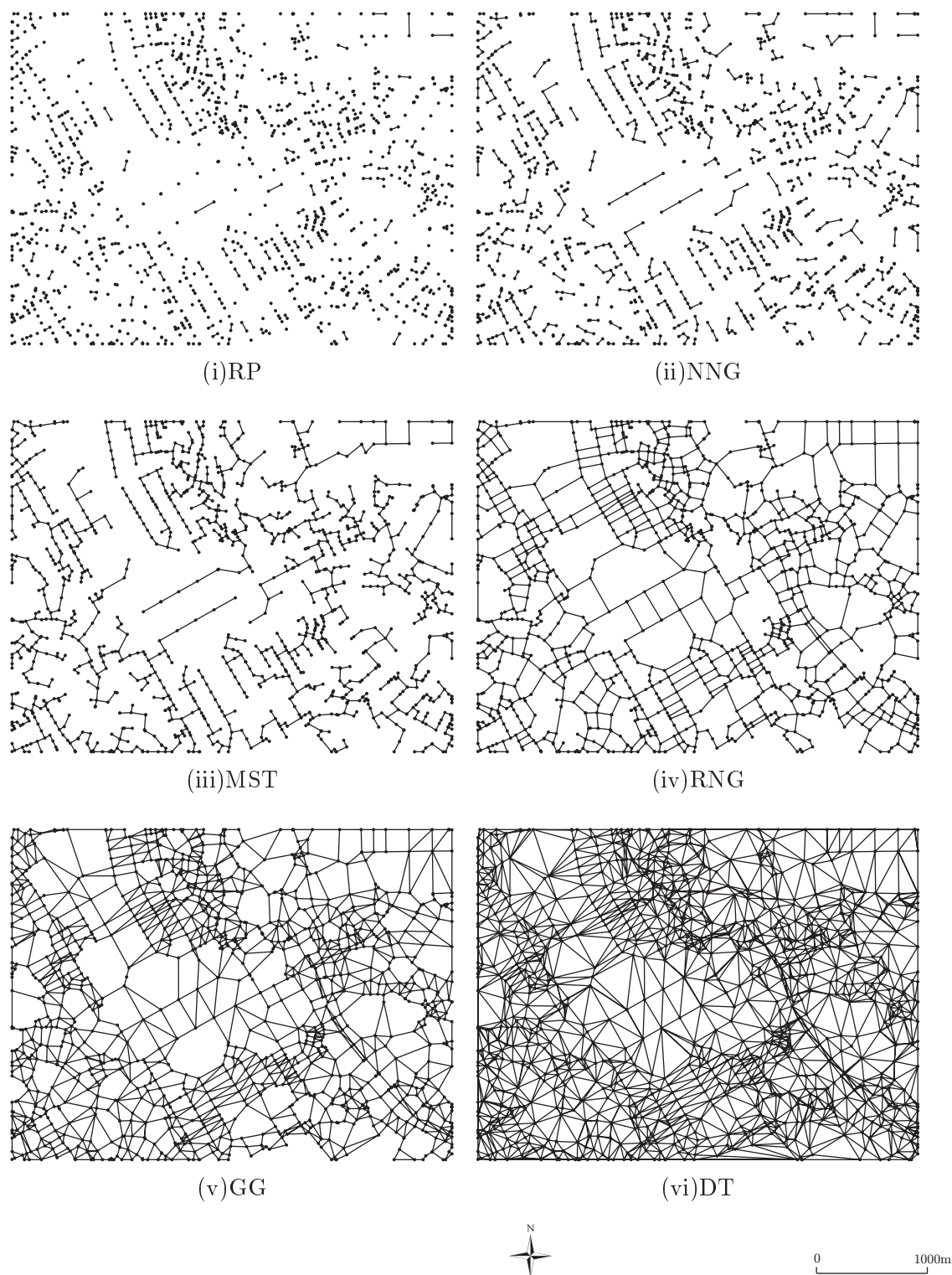


図 3.13: 道路点より生成した近接グラフと最小木

3.4. 近接性に関するグラフによる都市内道路網の分析

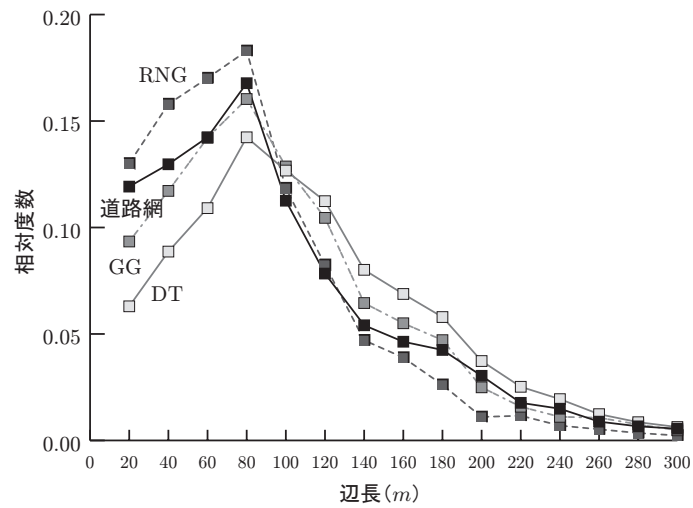


図 3.14: 近接グラフと道路辺の辺長分布（つくばセンター地区）

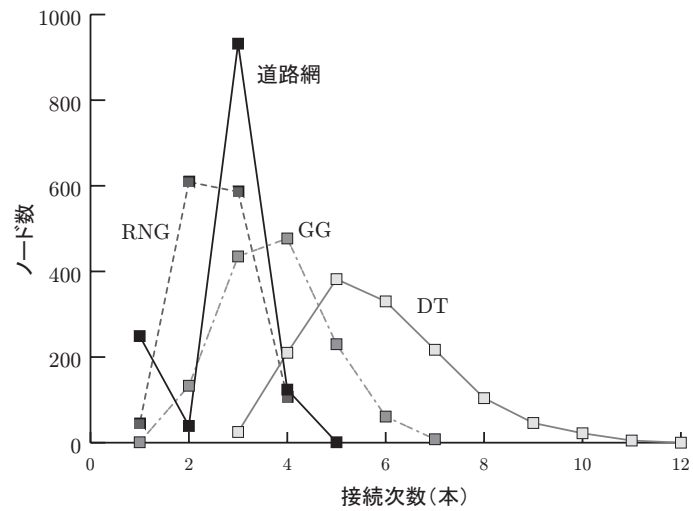


図 3.15: 近接グラフと道路辺の次数分布（つくばセンター地区）

第3章 交差点間の近接性に着目した都市内道路網形態の解析

3.4.2 近接性による道路辺の構築原理の把握

近接性の異なる各グラフを構築した辺と道路辺とを重ね合わせて比較すると、図 3.16 のようになる。黒色が元の道路辺、赤色が道路辺と一致した近接グラフの辺、青色が道路辺と一致せず余分に構築した近接グラフの辺である。孤立最近接対 RP においては、ごく近い点同士しか一致した辺がないが、ドローネ網 DT へと近接性が変化するにつれて、一致した辺の本数が多くなる一方、余分に構築した辺の本数も多くなることが分かる。

下記にグラフごとに考察する。

- (i) 孤立最近接対 RP：全ての点から辺があるわけではなく、行き止まりや格子状道路網の短辺などごく近い辺が一致している場合が多い。
- (ii) 最近傍グラフ NNG：孤立最近接対 RP よりは増えたが連結グラフではなく、近い点同士を結んでいるため短い辺が一致している場合が多い。
- (iii) 最小木 MST：NNG に比べて比較的長い辺も見られるが、格子状道路の短辺が連続して一致している場合が多い。
- (iv) 相対近傍グラフ RNG：道路網と一致した辺も連結グラフとなり、格子状道路の短辺のほぼ全てが一致した辺となった。
- (v) ガブリエルグラフ GG：集落でも連結されるようになり、格子状道路のほぼ全てが一致した辺となった。その反面で余分に構築した辺（青色）も多くなってくる。
- (vi) ドローネ網 DT：中心にある曲線道路も選ばれ、区画道路におけるほとんどの道路辺が一致した辺となった。そして、余分に構築した辺によって、全ての街区が三角形分割されるようになる。
- (vii) 完全グラフ CG：ドローネ網 DT において不足している辺（黒色）は、近接グラフで説明できなかった辺である。

上記結果より、各道路辺と一致したグラフ辺に応じて色分けすると、図 3.17 のようになる。孤立最近接対 RP と最近傍グラフ NNG、最小木 MST の辺は、区画道路の比較的短い道路辺に多く見られる。相対近傍グラフ RNG とガブリエルグラフ GG の辺は、格子状道路の長辺で見られる。ドローネ網 DT と完全グラフ CG の辺は、幹線道路に多く見られる。これらの多くは、幹線道路（例えば、東大通、西大通）や行止り（特に、集落内）などの都市構造や地形起伏（特に、花室川沿い）などにより、直線距離による近接性だけでは説明できない区間であることが分かる。

3.4. 近接性に関するグラフによる都市内道路網の分析

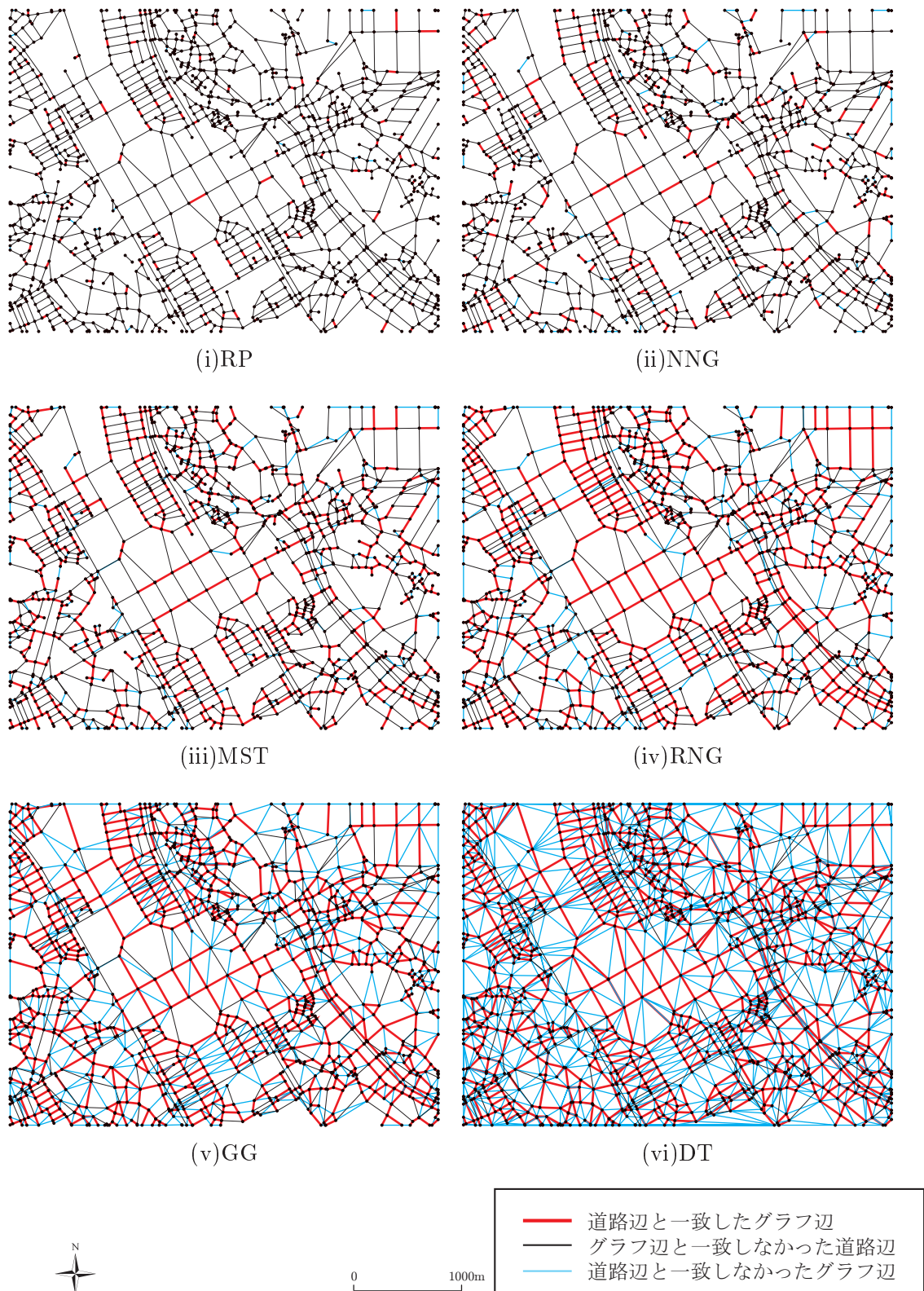


図 3.16: 近接性に関するグラフと道路辺の比較

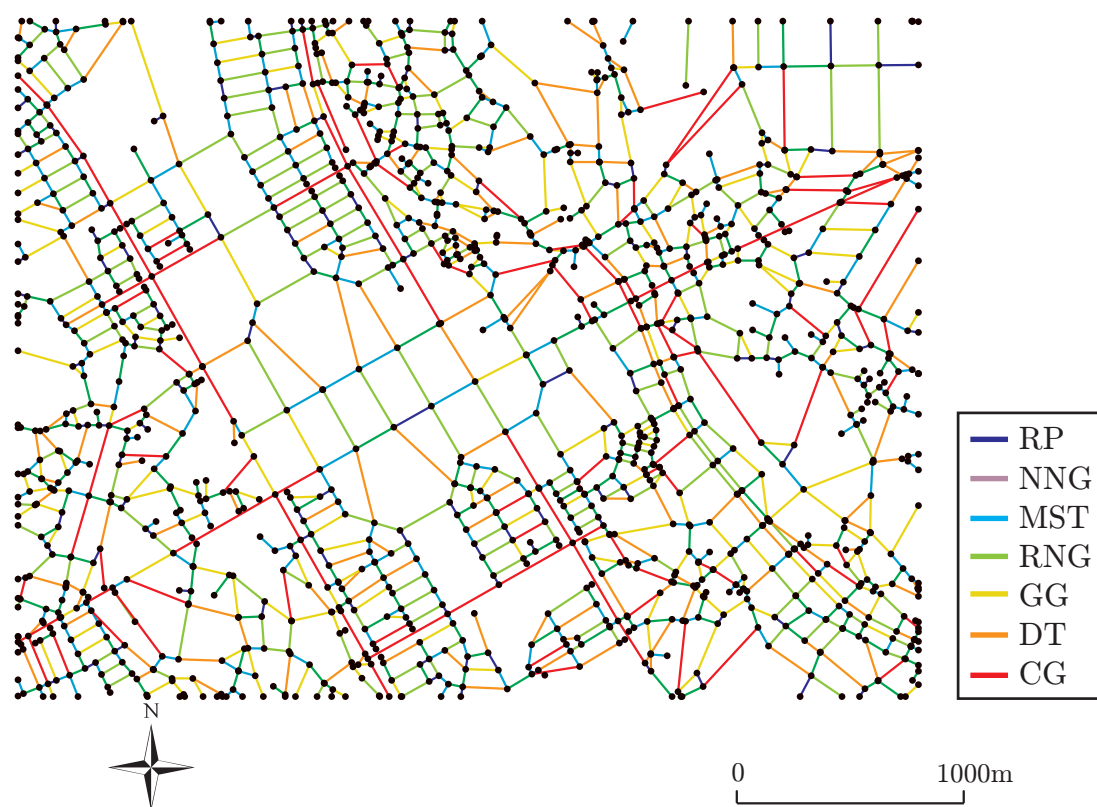


図 3.17: 道路辺ごとのグラフ辺との重ね合わせ

3.4.3 各種構成比率による比較

前節でつくばセンターにおいて道路辺とグラフ辺を重ね合わせた結果を用いて、3.2.2 節で定義した3種類の構成比率を計算すると、道路構成比率 RR は表 3.11、グラフ構成比率 GR は表 3.12、総合構成比率 ER は表 3.13 のようになる。その結果をプロットすると、図 3.18 のようになる。

道路構成比率 RR は、孤立最近接対 RP からドローネ網 DT へと構築される辺の本数が増加するほど、道路辺とグラフ辺が一致する辺の本数が増加するため、 RR の値は増加する。相対近傍グラフ RNG について、 $RR_{RNG}=0.72$ という値になり、格子状道路網で構成されている部分が 72%の道路辺であることが分かる。ドローネ網 DT について、 $RR_{DT}=0.94$ とかなり高い値となり、近接グラフにより約 94%の道路辺が説明できることが分かる。

一方、グラフ構成比率 GR は、孤立最近接対 RP からドローネ網 DT へと構築されるグラフ辺の本数が増加するとともに、道路辺と一致しないグラフ辺も増加するために、 GR の値が減少する。特に、相対近傍グラフ RNG からドローネ網 DT にかけて、構築されるグラフ辺数が非常に増えるため、 GR の値は大きく減少する。

そのバランスを見る指標である総合構成比率 ER を見ると、孤立最近接対 RP から相対近傍グラフ RNG まで増加するが、相対近傍グラフ RNG で最大となってからは減少する。これより、図面において引かれた全ての辺に対して一致した辺の割合が、相対近傍グラフ RNG においても最も高いということが分かる。

これら3つの指標で、道路辺とグラフ辺が一致する辺についての評価を行ったが、グラフ構成指標 GR と総合構成比率 ER では、相対近傍グラフ RNG において特徴が見られた。

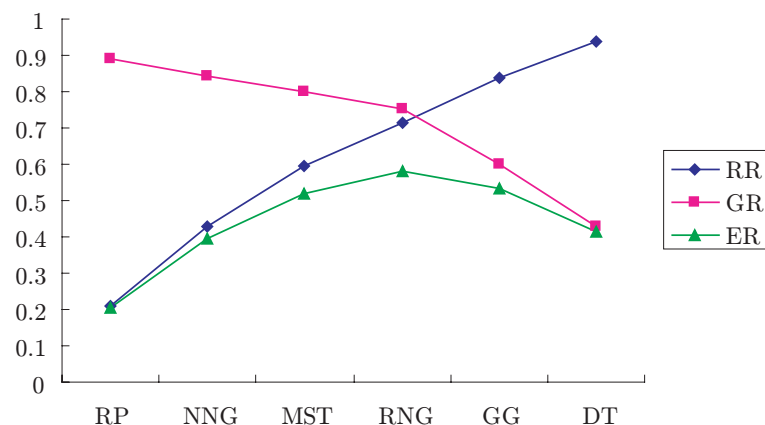


図 3.18: 構成比率 (つくばセンター地区)

第3章 交差点間の近接性に着目した都市内道路網形態の解析

3.4.4 構成比率による全国都市間比較

対象地区である表 3.4 の 22 地区について、3.4.2 節と同様の方法で各グラフを構築する。表 3.9 に各グラフの構築辺の総本数、表 3.10 に各グラフの構築辺の総延長をまとめる。道路網データ及び構築結果である重ね合わせの結果の地図は、付録 A.1 にまとめる。特に、CF と GTP の形態指標において特徴的であった地区について、各構成比率を用いて考察する。

道路構成比率 RR

道路構成比率 RR は表 3.11 より図 3.19 のようになる。高密度な市街地である名古屋と上野では、大きな違いが見られない。

孤立最近接対 RP からドローネ網 DT へ構築されるグラフ辺が増加するとともに、各地区ともに道路構成比率 RR の値は増加する。ドローネ網 DT において、名古屋と上野では約 0.97 という非常に高い値となり、これより近接グラフによって 97% という大部分の道路網を構築することができる。

最小木 MST まではつくばが一番高いが、相対近傍グラフ RNG では名古屋と上野がほぼ同じ値で急増する。これらの地区は区画整理が行われており、正方格子点分布における相対近傍グラフ RNG である格子状道路網が広範囲で整備されている。

グラフ構成比率 GR

グラフ構成比率 GR は表 3.12 より図 3.20 のようになる。道路構成比率 RR と同様に、高密度な市街地である名古屋と上野では、大きな違いが見られない。

孤立最近接対 RP からドローネ網 DT へ構築されるグラフ辺が増加するとともに、各地区ともにグラフ構成比率 GR は減少し、特に相対近傍グラフ RNG からガブリエルグラフ GG とドローネ網 DT にかけて大きく減少している。これより、グラフ辺における道路辺でない余分に引いた辺が多くなることが分かる。名古屋と上野において、相対近傍グラフ RNG までは 0.9 以上と高い値であり、辺がかなり一致しているというように高い説明力がある。

総合構成比率 ER

総合構成比率 ER は、表 3.13 より図 3.21 のようになり、各地区ともに相対近傍グラフ RNG が最大となる。最小木 MST まではどの地区もほぼ同じ数値をとっており、道路網形態によらないことが分かる。名古屋と上野において、相対近傍グラフ RNG で最大の 82% 程度というように高い説明力がある。

総合構成比率 ER は、表 3.13 より図 3.21 のようになる。道路構成比率 RR とグラフ構成比

3.4. 近接性に関するグラフによる都市内道路網の分析

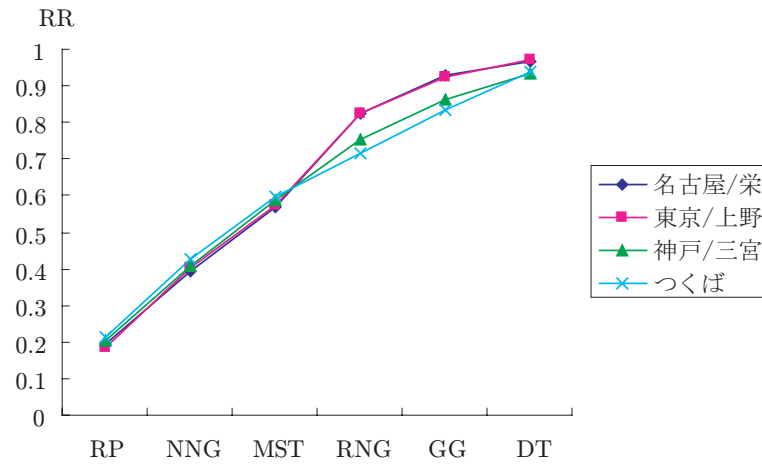


図 3.19: 道路構成比率 RR

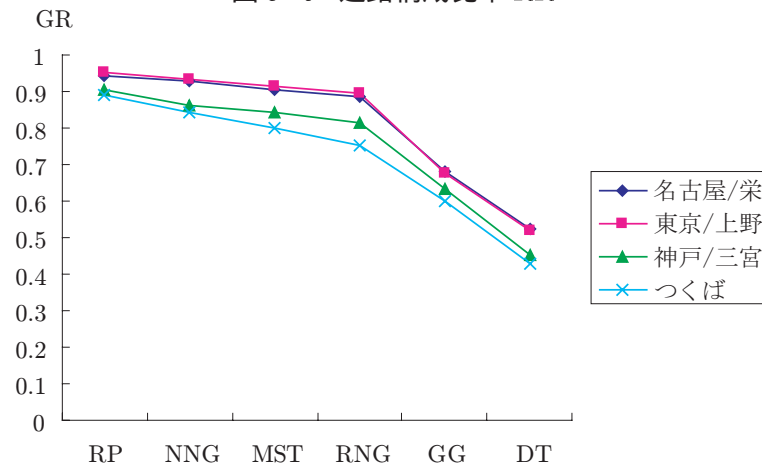


図 3.20: グラフ構成比率 GR

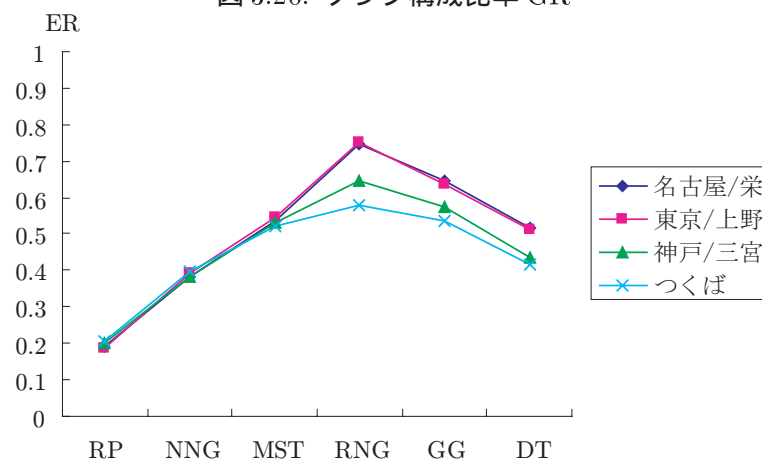


図 3.21: 総合構成比率 ER

第3章 交差点間の近接性に着目した都市内道路網形態の解析

率 GR と同様に，高密な市街地である名古屋と上野では，大きな違いが見られない．

孤立最近接対 RP から構築されるグラフ辺が増加するとともに総合構成比率 ER は増加するが，相対近傍グラフ RNG が最大となってからドローネ網 DT までは減少する．最小木 MST まではどの地区もほぼ同じ数値をとっており，道路網形態によらないことが分かる．名古屋と上野において，相対近傍グラフ RNG で最大の 0.82 程度というように高い説明力がある．

表 3.9: 近接グラフと最小木の構築辺の総本数

都市名	道路網	RP	NNG	MST	RNG	GG	DT
東京・東京駅	4,883	959	2,169	3,127	4,484	6,593	9,154
東京・上野	8,004	1,574	3,454	5,025	7,393	10,954	14,951
東京・新宿	6,214	1,436	3,052	4,487	5,897	8,853	13,246
東京・渋谷	4,581	1,068	2,306	3,372	4,382	6,648	9,973
東京・池袋	8,975	2,094	4,359	6,450	8,603	13,082	19,141
札幌	2,686	553	1,151	1,702	2,561	3,620	4,950
仙台	2,530	580	1,262	1,841	2,487	3,743	5,396
さいたま	7,214	1,650	3,673	5,321	7,072	10,722	15,715
千葉	5,017	1,146	2,443	3,587	4,726	7,102	10,692
川崎	5,167	1,124	2,523	3,645	4,898	7,502	10,857
横浜	5,007	1,090	2,347	3,436	4,809	7,155	10,235
静岡	5,054	1,085	2,316	3,400	4,746	7,090	10,072
名古屋	3,924	798	1,669	2,465	3,645	5,344	7,248
京都・上京	4,768	1,065	2,289	3,353	4,583	6,577	9,879
京都・下京	5,599	1,302	2,631	3,931	5,285	7,550	11,635
大阪・中之島	5,197	1,065	2,311	3,372	4,858	7,052	9,907
大阪・難波	5,198	1,063	2,299	3,361	4,884	7,119	9,890
神戸	6,371	1,435	3,006	4,439	5,903	8,682	13,175
広島	3,787	766	1,697	2,462	3,475	5,128	7,215
福岡	4,796	1,044	2,192	3,235	4,319	6,383	9,500
北九州	3,330	713	1,547	2,259	2,990	4,482	6,626
つくば	1,808	430	915	1,344	1,722	2,526	3,969

3.4. 近接性に関するグラフによる都市内道路網の分析

表 3.10: 近接グラフと最小木の構築辺の総延長

都市名	RP	NNG	MST	RNG	GG	DT
東京・東京駅	218,061	659,993	1,105,282	2,021,991	3,605,795	6,159,332
東京・上野	328,593	948,566	1,592,101	2,967,467	5,271,970	9,262,034
東京・新宿	271,479	809,017	1,420,227	2,355,536	4,467,832	7,854,840
東京・渋谷	225,333	690,932	1,200,697	1,947,786	3,736,482	6,664,177
東京・池袋	365,784	1,028,853	1,800,704	3,002,539	5,621,312	10,270,176
札幌	202,549	523,345	904,913	1,871,736	3,120,953	4,864,385
仙台	180,723	543,428	932,700	1,608,807	2,969,174	4,961,322
さいたま	312,058	959,324	1,612,803	2,722,262	5,063,794	8,521,049
千葉	230,256	700,945	1,238,418	2,061,626	3,844,574	7,528,545
川崎	242,594	743,539	1,266,228	2,141,423	4,053,886	7,752,646
横浜	234,533	669,384	1,146,032	2,070,560	3,704,266	6,842,427
静岡	253,918	749,124	1,291,488	2,340,000	4,281,394	7,373,442
名古屋	259,343	710,053	1,190,957	2,267,485	3,884,658	6,460,046
京都・上京	218,752	672,715	1,172,195	2,189,324	3,860,265	6,591,974
京都・下京	246,769	696,091	1,280,962	2,308,823	4,111,917	7,546,626
大阪・中之島	271,238	768,456	1,316,638	2,515,159	4,293,451	6,677,210
大阪・難波	268,306	770,466	1,329,212	2,527,986	4,389,653	6,728,505
神戸	219,645	684,857	1,211,893	2,053,473	3,789,001	7,245,994
広島	210,620	647,791	1,093,004	2,015,475	3,587,236	5,755,107
北九州	193,583	558,978	974,931	1,633,886	3,047,936	5,412,115
福岡	197,925	660,117	1,221,680	2,185,198	4,040,828	6,887,631
つくば	119,677	412,692	749,369	1,267,167	2,298,450	5,231,513

表 3.11: 各地区の道路構成比率 RR

都市名	RR _{RP}	RR _{NNG}	RR _{MST}	RR _{RNG}	RR _{GG}	RR _{DT}
つくば	0.21	0.43	0.60	0.72	0.84	0.94
東京・東京駅	0.18	0.40	0.57	0.80	0.89	0.95
東京・上野	0.19	0.40	0.57	0.82	0.92	0.97
東京・新宿	0.21	0.42	0.60	0.74	0.86	0.94
東京・渋谷	0.20	0.41	0.58	0.72	0.84	0.93
東京・池袋	0.21	0.42	0.59	0.75	0.88	0.95
札幌	0.19	0.40	0.58	0.86	0.93	0.97
仙台	0.20	0.41	0.57	0.75	0.86	0.94
さいたま	0.20	0.43	0.58	0.73	0.86	0.94
千葉	0.20	0.41	0.58	0.73	0.85	0.93
横浜	0.19	0.39	0.56	0.76	0.86	0.93
川崎	0.19	0.40	0.56	0.73	0.86	0.94
静岡	0.20	0.40	0.57	0.79	0.89	0.96
名古屋	0.19	0.40	0.57	0.82	0.93	0.97
京都・上京	0.21	0.43	0.61	0.80	0.89	0.96
京都・下京	0.22	0.42	0.61	0.79	0.89	0.95
大阪・中之島	0.18	0.38	0.54	0.78	0.87	0.94
大阪・難波	0.19	0.40	0.57	0.80	0.90	0.96
神戸	0.20	0.41	0.59	0.76	0.86	0.93
広島	0.19	0.40	0.57	0.79	0.89	0.96
北九州	0.19	0.39	0.55	0.71	0.84	0.92
福岡	0.20	0.41	0.58	0.75	0.86	0.95

3.4. 近接性に関するグラフによる都市内道路網の分析

表 3.12: 各地区のグラフ構成比率 GR

都市名	GR_{RP}	GR_{NNG}	GR_{MST}	GR_{RNG}	GR_{GG}	GR_{DT}
つくば	0.89	0.84	0.80	0.75	0.60	0.43
東京・東京駅	0.91	0.89	0.88	0.87	0.66	0.50
東京・上野	0.95	0.93	0.91	0.89	0.67	0.52
東京・新宿	0.91	0.86	0.83	0.78	0.60	0.44
東京・渋谷	0.87	0.82	0.78	0.75	0.58	0.43
東京・池袋	0.91	0.86	0.83	0.78	0.60	0.44
札幌	0.94	0.92	0.91	0.90	0.69	0.53
仙台	0.86	0.82	0.79	0.77	0.58	0.44
さいたま	0.89	0.84	0.79	0.75	0.58	0.43
千葉	0.89	0.85	0.81	0.77	0.60	0.44
横浜	0.89	0.84	0.81	0.79	0.60	0.45
川崎	0.89	0.83	0.79	0.77	0.59	0.45
静岡	0.92	0.88	0.85	0.84	0.64	0.48
名古屋	0.94	0.93	0.91	0.89	0.68	0.52
京都・上京	0.93	0.89	0.87	0.83	0.65	0.46
京都・下京	0.93	0.90	0.86	0.84	0.66	0.46
大阪・中之島	0.89	0.86	0.84	0.83	0.64	0.49
大阪・難波	0.93	0.90	0.88	0.85	0.66	0.50
神戸	0.91	0.86	0.84	0.82	0.63	0.45
広島	0.93	0.90	0.88	0.86	0.66	0.50
北九州	0.88	0.84	0.81	0.79	0.62	0.46
福岡	0.93	0.89	0.86	0.83	0.64	0.48

表 3.13: 各地区の総合構成比率 RR

都市名	ER_{RP}	ER_{NNG}	ER_{MST}	ER_{RNG}	ER_{GG}	ER_{DT}
つくば	0.21	0.40	0.52	0.58	0.54	0.42
東京・東京駅	0.17	0.38	0.53	0.72	0.61	0.49
東京・上野	0.19	0.39	0.54	0.75	0.64	0.51
東京・新宿	0.21	0.39	0.53	0.62	0.55	0.43
東京・渋谷	0.20	0.38	0.50	0.58	0.52	0.41
東京・池袋	0.21	0.39	0.53	0.62	0.56	0.43
札幌	0.19	0.38	0.55	0.78	0.65	0.52
仙台	0.19	0.37	0.50	0.61	0.53	0.43
さいたま	0.20	0.39	0.50	0.59	0.53	0.42
千葉	0.20	0.38	0.51	0.60	0.54	0.43
横浜	0.19	0.37	0.49	0.63	0.55	0.44
川崎	0.19	0.37	0.49	0.60	0.54	0.43
静岡	0.19	0.38	0.52	0.68	0.59	0.47
名古屋	0.19	0.38	0.54	0.75	0.65	0.52
京都・上京	0.20	0.41	0.56	0.68	0.60	0.45
京都・下京	0.21	0.40	0.55	0.69	0.61	0.45
大阪・中之島	0.18	0.36	0.49	0.67	0.59	0.48
大阪・難波	0.19	0.38	0.52	0.71	0.61	0.49
神戸	0.20	0.38	0.53	0.64	0.57	0.44
広島	0.18	0.39	0.53	0.70	0.61	0.49
北九州	0.18	0.36	0.49	0.60	0.55	0.45
福岡	0.20	0.39	0.53	0.65	0.58	0.47

3.4.5 道路構成比率と形態指標による比較

道路構成比率 RR と形態指標 GTP の関係

道路構成比率 RR と結合性に関する指標 GTP の関係をプロットすると、図 3.22 のようになる。孤立最近接対 RP 、最近傍グラフ NNG 、最小木 MST については、道路構成比率 RR が大きいほど GTP が小さいという反比例の関係が見られるが、その関係は強くない。一方、相対近傍グラフ RNG 、ガブリエルグラフ GG 、ドローネ網 DT については、道路構成比率 RR が大きいほど GTP が大きいという正比例の関係が見られる。

道路点で構築した相対近傍グラフ RNG と正方格子状道路網との関係を考察する。道路構成比率 RR_{RNG} と GTP との関係を見ると、図 3.22(iv) より、 RR_{RNG} が最大になるのは札幌 (0.86) で、最小になるのは北九州 (0.71) である。傾向として、 RR_{RNG} が大きいほど GTP は大きい、その増分は減少していることが分かる。

格子状道路が基盤となっている京都（上京，下京）について見ると、 GTP では神戸との差がほとんどないが、 RR_{RNG} では約 0.8 と高い数値を示し、神戸との差が大きい。相対近傍グラフと道路網を比較した地図で確認すると、京都は図 3.24(i) と (ii) のようにまとまった格子状道路が見られる一方、神戸は図 3.24(iii) のように山地が多いために格子状道路が京都ほど多く見られない。つまり、 RR_{RNG} によって、格子状道路が多い地区を結合性指標 GTP よりも的確に評価できることが分かった。

道路構成比率 RR と形態指標 CF の関係

道路構成比率 RR と道路密度に関する指標 CF の関係をプロットすると、図 3.23 のようになる。孤立最近接対 RP 、最近傍グラフ NNG 、最小木 MST については、道路構成比率 RR が大きいほど CF が大きいという正比例の関係が見られるが、その関係は強くない。一方、相対近傍グラフ RNG 、ガブリエルグラフ GG 、ドローネ網 DT については、道路構成比率 RR が大きいほど CF が小さいという反比例の関係が見られる。

道路点で構築した相対近傍グラフ RNG と道路密度との関係を考察する。相対近傍グラフ RNG での道路構成比率 RR_{RNG} と CF との関係を見ると、傾向として、道路構成比率 RR_{RNG} が大きいほど、 CF は小さく道路密度が低いことが分かる。

図 3.23(iv) より、格子状道路が基盤となっている京都（上京，下京）について見ると、 CF では上京の方が下京よりも大きい一方、 RR_{RNG} は上京の方が高い。相対近傍グラフと道路網を比較した地図で確認すると、上京は図 3.24(i) のように京都御所など大きな街区があるために道路密度が低く、下京は図 3.24(ii) のように鉄道などにより格子状道路網が分断されていることなどが影響している。つまり、 RR_{RNG} によって、空地などの影響を除去して道路密度を的確に評価できることが分かった。

第3章 交差点間の近接性に着目した都市内道路網形態の解析

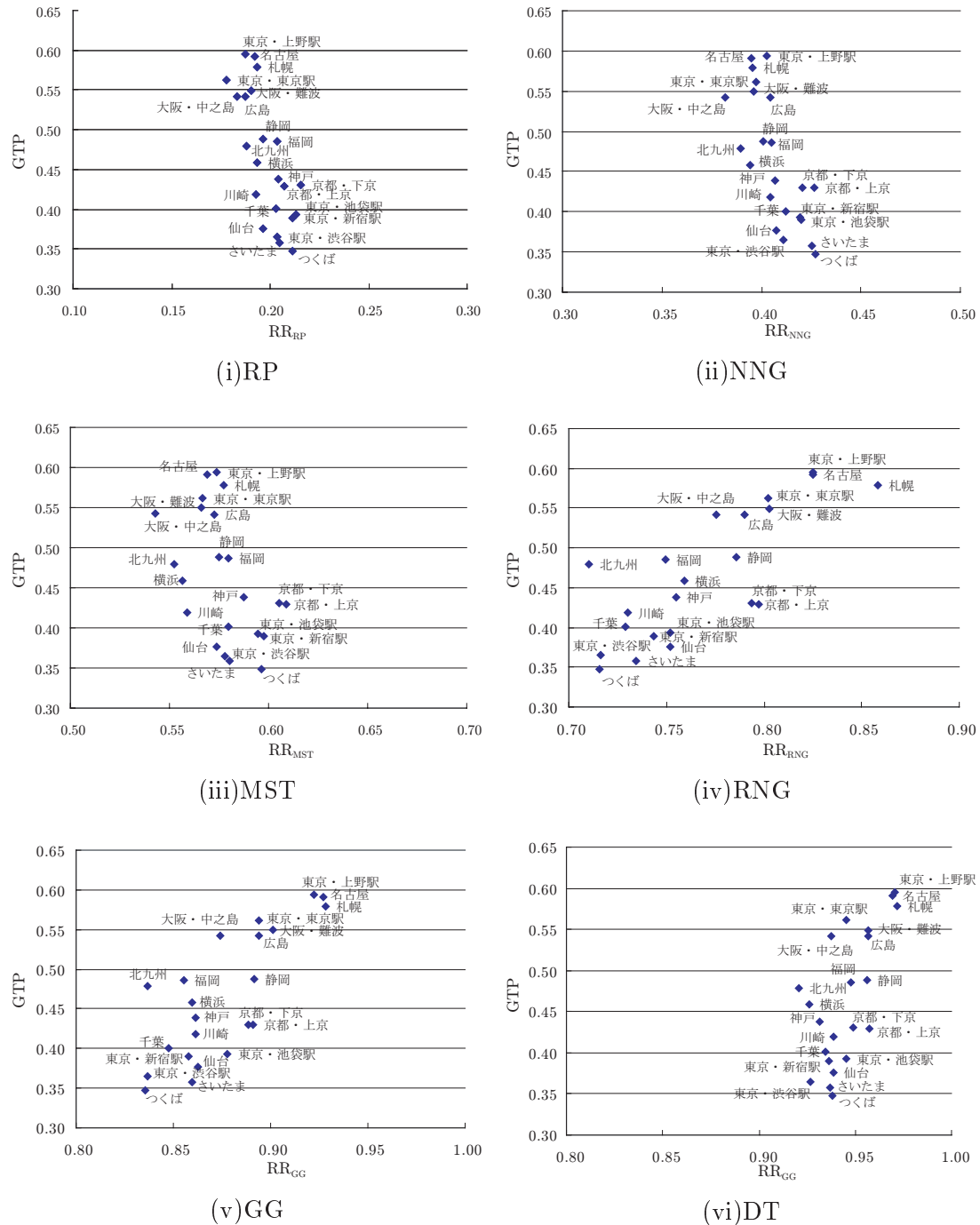


図 3.22: 道路構成比率 RR と GTP の比較

3.4. 近接性に関するグラフによる都市内道路網の分析

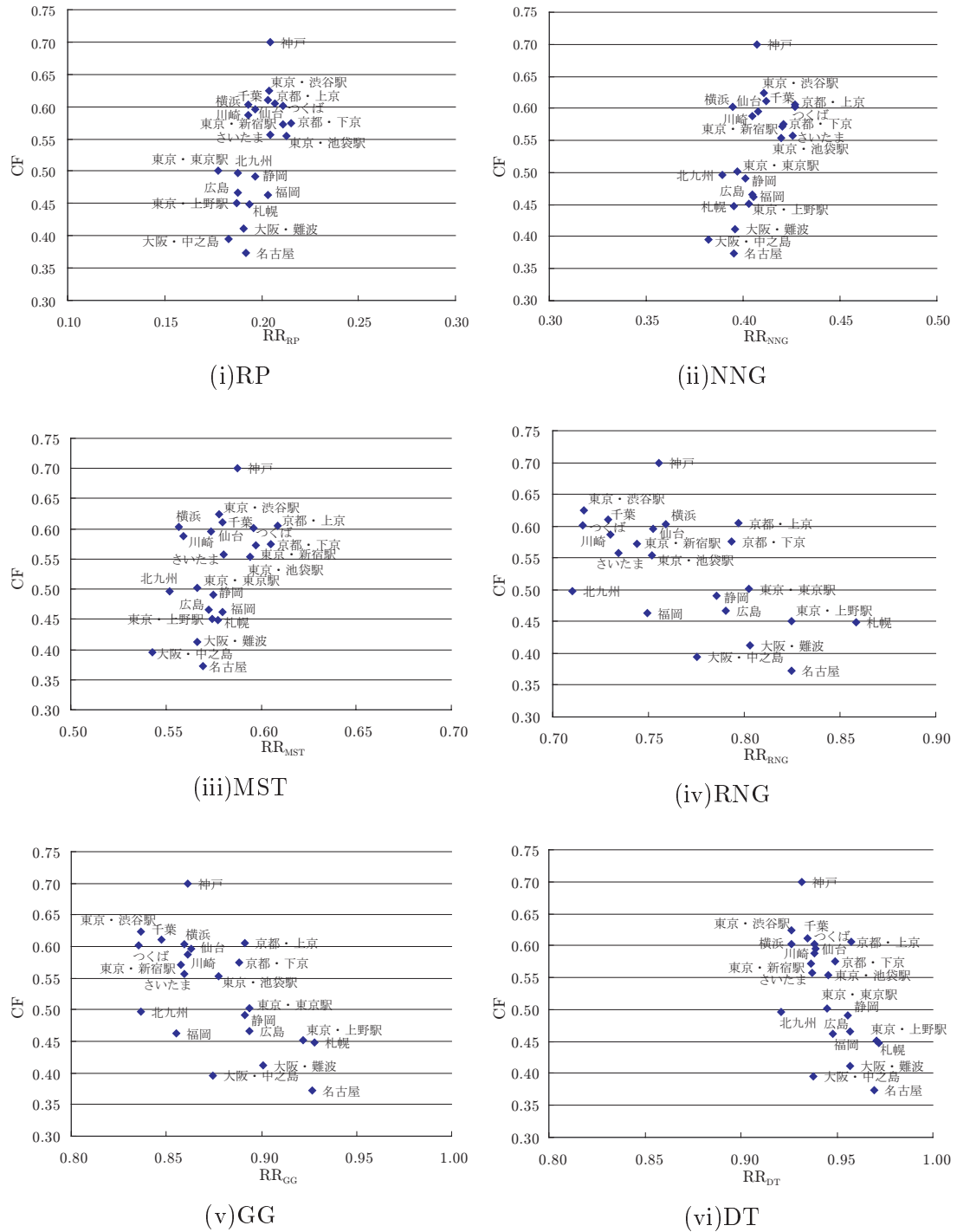
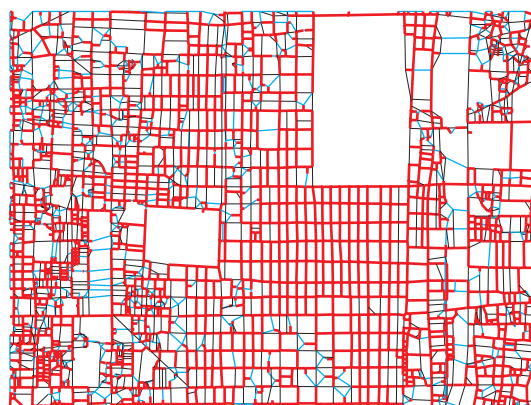
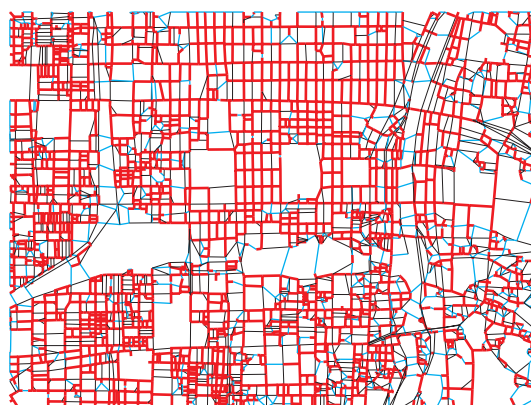


図 3.23: 道路構成比率 RR と CF の比較

第3章 交差点間の近接性に着目した都市内道路網形態の解析



(i) 京都・上京



(ii) 京都・下京



(iii) 神戸



0 1000m

- 道路辺と一致したグラフ辺
- グラフ辺と一致しなかった道路辺
- 道路辺と一致しなかったグラフ辺

図 3.24: 相対近傍グラフと道路辺の比較

3.5 米国道路網での分析

本節では、米国主要都市を対象として、前節まで日本主要都市を対象として行ってきた道路網の形態分析を行う。まず、使用する地図データの説明を行った後、既存の形態指標を用いて道路網形態の都市間比較を行う。そして、近接性に関するグラフと道路網の重ね合わせによる比較により、道路網一本一本の構築原理を把握する。その結果を各種構成比率を用いて都市間比較を行い、既存の形態指標との関係について考察を行う。

3.5.1 使用する地図データ

米国における都市内道路網のデータとして、「Census 2000 TIGER/Line」(以下、TIGER)を用いる。このデータは、U.S. Census Bureau (米国統計局)によって米国全土が整備されており、縮尺 1:24000 相当の地図情報レベルで作成されている。つまり、前節において日本の都市内道路網データとは異なる地図情報レベルであることに注意が必要である。

対象とする主要都市として、図 3.25 にある東海岸、内陸、西海岸の各地域における中心的な都市(計 10 地区)とする。各都市の中心地区として、各都市の役所や主要交通施設などを含む地区を Zip コードを用いて抽出したデータを用いて分析を行う。つまり、前節において日本の都市内道路網データのように同一の面積の領域でないことに注意が必要である。表 3.14 は、対象地区の道路網データの概要である。

地図データの作成及び結果の詳細については、付録 A.2 にて説明する。

表 3.14: 対象地区の道路網データ (米国)

都市名	点数 (個)	辺数 (本)	道路密度 (m/ha)	GTP	CF
New York	3,584	6,457	167	0.802	0.293
Washington D.C.	2,841	4,774	126	0.681	0.406
Chicago	4,458	7,265	135	0.630	0.366
Minneapolis	3,245	5,578	128	0.719	0.335
New Orleans	3,426	5,737	138	0.675	0.376
Dallas	3,840	6,228	111	0.622	0.486
Denver	3,170	5,406	135	0.706	0.334
Portland	4,630	7,801	157	0.685	0.398
San Francisco	4,473	7,185	167	0.607	0.364
San Diego	4,723	7,078	122	0.499	0.444

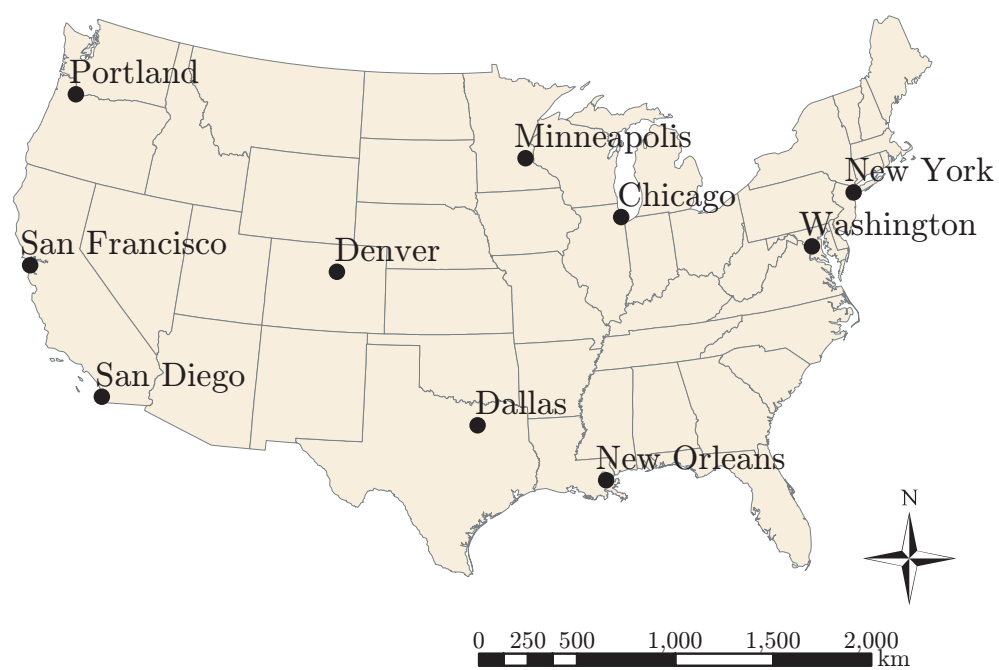


図 3.25: 対象地区（米国）

3.5.2 形態指標 CF と GTP の関係分析

既存の形態指標として、3.2.2 節で紹介した結合性に関する指標 GTP と道路密度に関する指標 CF を用いる。各格子状道路網については表 3.7 と表 3.8 の数値を、対象の都市道路網については表 3.14 の数値を用いる。GTP 指標は式 (3.2.5)、CF 指標は式 (3.2.8) に代入することにより求まる。GTP と CF の関係についてをプロットすると、図 3.26 のようになる。

各地区道路網の指標値を見ると、六角格子点における相対近傍グラフ（六角 RNG）と正方格子点における相対近傍グラフ（正方 RNG）の間に多くあるという性質があることが分かる。GTP は値が大きいほど結合性が高いと言え、最大が「New York」(GTP=0.802)、最小が「San Diego」(GTP=0.499)である。一方、CF は値が小さいほど道路密度が高いと言え、最小が「New York」(CF=0.293)、最大が「Dallas」(CF=0.486)である。両指標とも、道路網整備は New York が最も進んでいると評価している。

道路網について詳細に見るために、図 3.26 の一部を拡大したものをプロットすると、図 3.27 のようになる。ほぼ全ての都市において、六角格子点における相対近傍グラフ（六角 RNG）と六角格子点における相対近傍グラフ（正方 RNG）の間にあり、特に New York は CF と GTP の両方において正方 RNG に最も近いことが分かる。

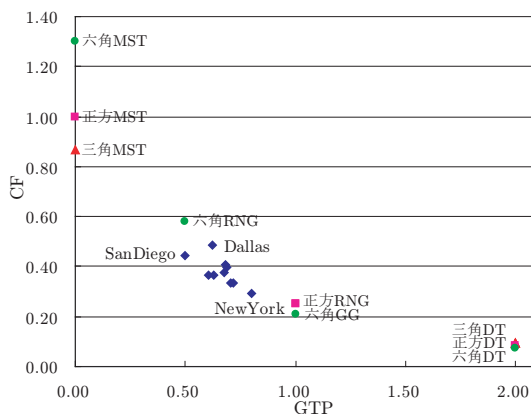


図 3.26: 各形態指標によるグラフと道路網の比較（米国都市）

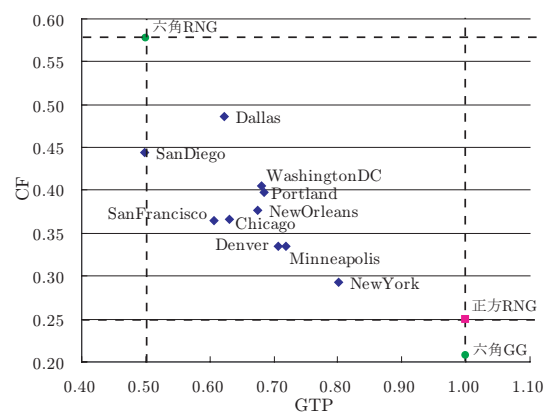


図 3.27: 各形態指標によるグラフと道路網の比較（米国都市・拡大）

3.5.3 道路構成比率と形態指標による比較

近接性に関するグラフの構築と辺の重ね合わせ

対象地区である表 3.14 の 10 地区について、3.4.2 節と同様の方法で近接性に関するグラフを構築する。表 3.15 に各グラフの構築辺の総本数、表 3.16 に各グラフの構築辺の総延長をまとめる。

第3章 交差点間の近接性に着目した都市内道路網形態の解析

道路辺とグラフ辺を重ね合わせた結果を用いて、3.2.2 節で定義した3種類の構成比率を導出することができる。道路網データ及び構築結果である重ね合わせの結果の地図は、付録 A.2 にまとめる。

道路構成比率 RR は表 3.17、グラフ構成比率 GR は表 3.18、総合構成比率 ER は表 3.19 のようになる。

表 3.15: 近接グラフと最小木の構築辺の総本数（米国都市）

都市名	RP	NNG	MST	RNG	GG	DT
New York	1,188	2,396	3,583	5,567	7,825	10,719
Washington D.C.	876	1,968	2,840	4,049	6,106	8,507
Chicago	1,414	3,052	4,457	6,549	9,578	13,355
Minneapolis	1,050	2,208	3,244	5,215	7,211	9,698
New Orleans	1,139	2,293	3,425	5,223	7,456	10,258
Dallas	1,169	2,675	3,839	5,404	8,023	11,499
Denver	1,060	2,117	3,169	5,194	7,092	9,486
Portland	1,537	3,111	4,629	7,405	10,494	13,865
San Francisco	1,399	3,077	4,472	6,579	9,760	13,394
San Diego	1,483	3,245	4,721	6,825	10,081	14,147

表 3.16: 近接グラフと最小木の構築辺の総延長（米国都市）

都市名	RP	NNG	MST	RNG	GG	DT
New York	677,069	1,513,238	2,473,497	5,686,998	9,206,550	15,612,806
Washington D.C.	473,141	1,350,617	2,241,190	4,062,147	7,328,931	12,852,021
Chicago	833,416	2,190,932	3,600,553	6,925,535	12,018,745	21,058,837
Minneapolis	746,622	1,790,093	2,923,377	6,496,982	10,164,874	16,358,680
New Orleans	619,890	1,536,970	2,641,522	5,153,326	8,622,345	15,988,207
Dallas	582,058	1,772,797	2,891,228	5,133,928	9,154,614	17,593,275
Denver	771,455	1,727,732	2,876,244	6,361,155	9,848,414	18,586,130
Portland	850,975	1,988,827	3,217,897	6,409,460	10,589,076	17,835,093
San Francisco	693,327	1,851,206	3,000,799	5,784,875	10,059,601	16,592,923
San Diego	854,003	2,318,185	3,818,467	6,993,145	12,274,776	23,004,977

表 3.17: 各地区の道路構成比率 RR (米国都市)

都市名	RP	NNG	MST	RNG	GG	DT
New York	0.18	0.35	0.52	0.80	0.90	0.96
Washington D.C.	0.17	0.37	0.53	0.74	0.87	0.95
Chicago	0.17	0.36	0.52	0.76	0.87	0.94
Minneapolis	0.18	0.36	0.51	0.83	0.90	0.96
New Orleans	0.18	0.36	0.52	0.79	0.88	0.95
Dallas	0.17	0.37	0.52	0.72	0.83	0.92
Denver	0.18	0.36	0.54	0.88	0.94	0.98
Portland	0.18	0.36	0.53	0.84	0.92	0.97
San Francisco	0.18	0.37	0.52	0.76	0.87	0.94
San Diego	0.18	0.37	0.52	0.75	0.86	0.93

表 3.18: 各地区のグラフ構成比率 GR (米国都市)

都市名	RP	NNG	MST	RNG	GG	DT
New York	0.96	0.94	0.93	0.93	0.74	0.58
Washington D.C.	0.95	0.91	0.89	0.87	0.68	0.54
Chicago	0.89	0.86	0.85	0.85	0.66	0.51
Minneapolis	0.94	0.90	0.88	0.89	0.70	0.55
New Orleans	0.92	0.90	0.87	0.87	0.68	0.53
Dallas	0.90	0.87	0.84	0.83	0.65	0.50
Denver	0.94	0.92	0.91	0.91	0.72	0.56
Portland	0.93	0.90	0.89	0.89	0.69	0.55
San Francisco	0.91	0.86	0.84	0.83	0.64	0.51
San Diego	0.86	0.80	0.78	0.78	0.60	0.46

表 3.19: 各地区の総合構成比率 ER (米国都市)

都市名	RP	NNG	MST	RNG	GG	DT
New York	0.18	0.34	0.50	0.76	0.68	0.56
Washington D.C.	0.17	0.36	0.49	0.67	0.62	0.52
Chicago	0.17	0.34	0.48	0.67	0.60	0.49
Minneapolis	0.17	0.34	0.48	0.75	0.65	0.54
New Orleans	0.18	0.34	0.48	0.71	0.62	0.52
Dallas	0.17	0.35	0.47	0.62	0.57	0.48
Denver	0.18	0.35	0.51	0.81	0.69	0.55
Portland	0.18	0.35	0.50	0.76	0.65	0.54
San Francisco	0.17	0.35	0.47	0.66	0.59	0.49
San Diego	0.18	0.34	0.46	0.62	0.55	0.45

第3章 交差点間の近接性に着目した都市内道路網形態の解析

道路構成比率 RR と GTP の関係

本節では、道路構成比率 RR に着目して分析する。

道路構成比率 RR と結合性を表す指標 GTP の関係をプロットすると、図 3.28 のようになる。孤立最近接対 RP 、最近傍グラフ NNG 、最小木 MST については、 GTP の値によらず道路構成比率 RR に大きな違いがないことが分かる。一方、相対近傍グラフ RNG 、ガブリエルグラフ GG 、ドローネ網 DT については、道路構成比率 RR が大きいほど GTP が大きいという正比例の関係が見られる。格子状道路が基盤となっている Portland について見ると、 GTP では Washington D.C. との差がほとんどないが、 RR_{RNG} では約 0.85 と高い数値を示し、Washington D.C. との差が大きく出ている。相対近傍グラフと道路網を比較した図 3.30 で確認すると、Portland は格子状道路が見られる一方、Washington D.C. は格子状道路網に斜め方向の道路網が加わっている。

このように、道路構成比率 RR_{RNG} によって、格子状道路が多い地区を GTP よりも的確に評価できることが分かった。

道路構成比率 RR と CF の関係

道路構成比率 RR と道路密度を表す指標 CF の関係をプロットすると、図 3.29 のようになる。孤立最近接対 RP 、最近傍グラフ NNG 、最小木 MST については、 CF の値によらず道路構成比率 RR に大きな違いがないことが分かる。一方、相対近傍グラフ RNG 、ガブリエルグラフ GG 、ドローネ網 DT については、道路構成比率 RR が大きいほど CF が小さいという反比例の関係が見られる。道路点で構築した RNG と道路密度との関係を見るため、道路構成比率 RR_{RNG} と CF との関係を見る。傾向として、 RR_{RNG} が大きいほど、 CF は小さく道路密度が低いことが分かる。

図 3.29(iv) より、格子状道路が基盤となっている Portland について見ると、 CF では Minneapolis の方が Portland よりも大きい一方、 RR_{RNG} は Portland の方が高い。相対近傍グラフと道路網を比較した図 3.30 で確認すると、Portland と Minneapolis とともに格子状道路が見られるが、Portland には川のような大きな空地が見られる。

このように、道路構成比率 RR_{RNG} によって、空地などにより道路密度が低くなってしまうことの影響を受けずに、格子状道路が多い地区を的確に評価できることが分かった。

3.5. 米国道路網での分析

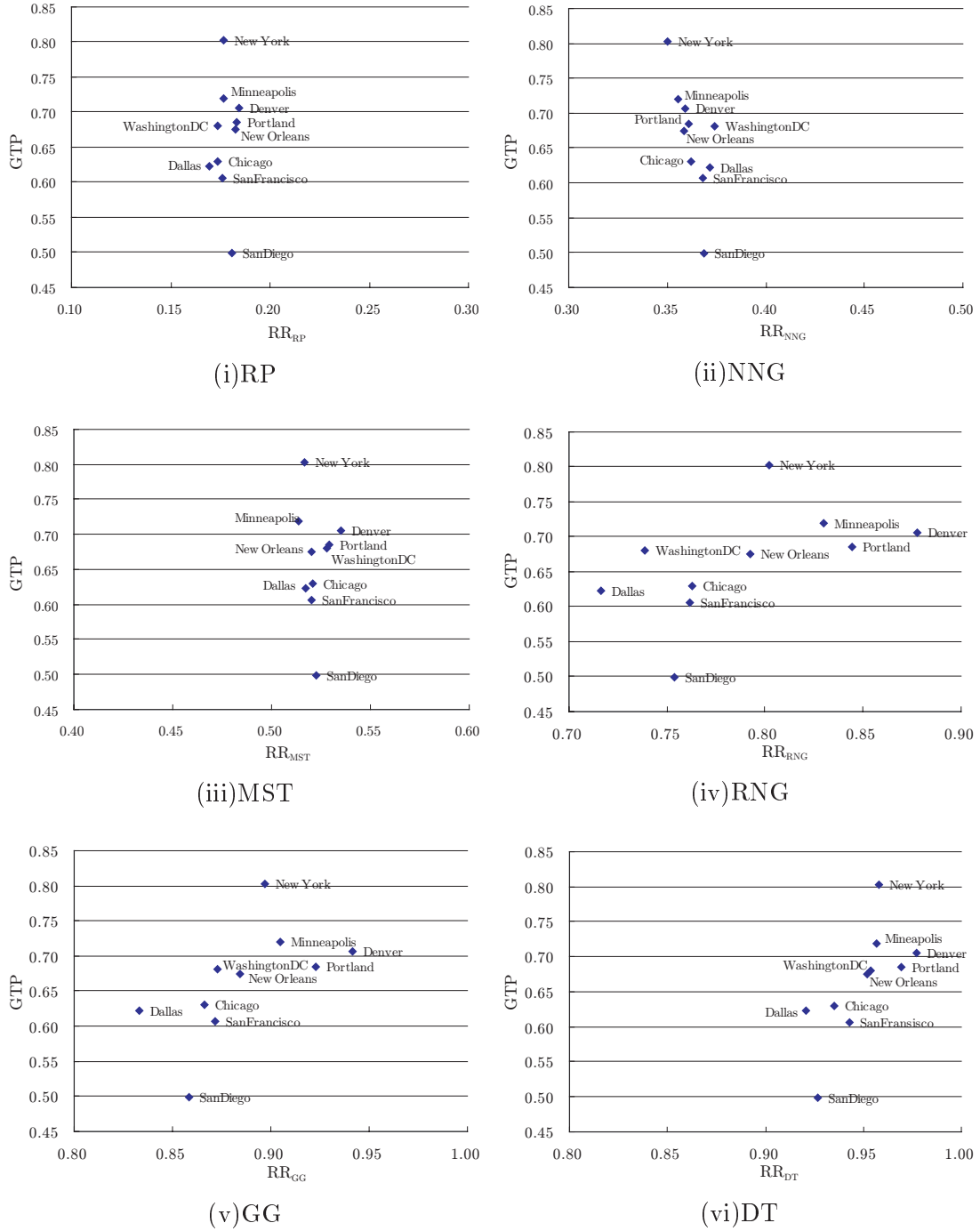


図 3.28: 道路構成比率 RR と GTP の比較 (米国都市)

第3章 交差点間の近接性に着目した都市内道路網形態の解析

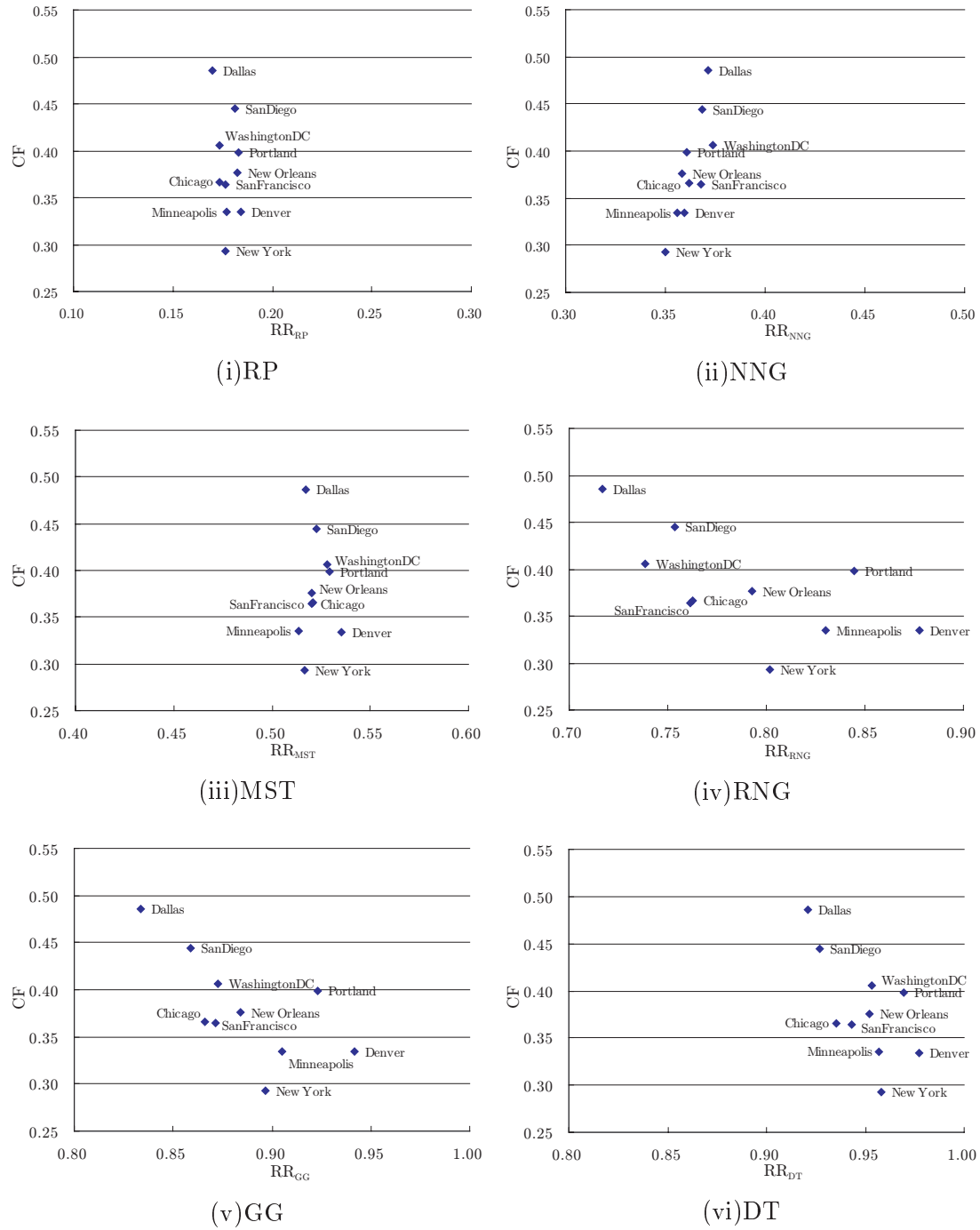


図 3.29: 道路構成比率 RR と CF の比較 (米国都市)

3.5. 米国道路網での分析

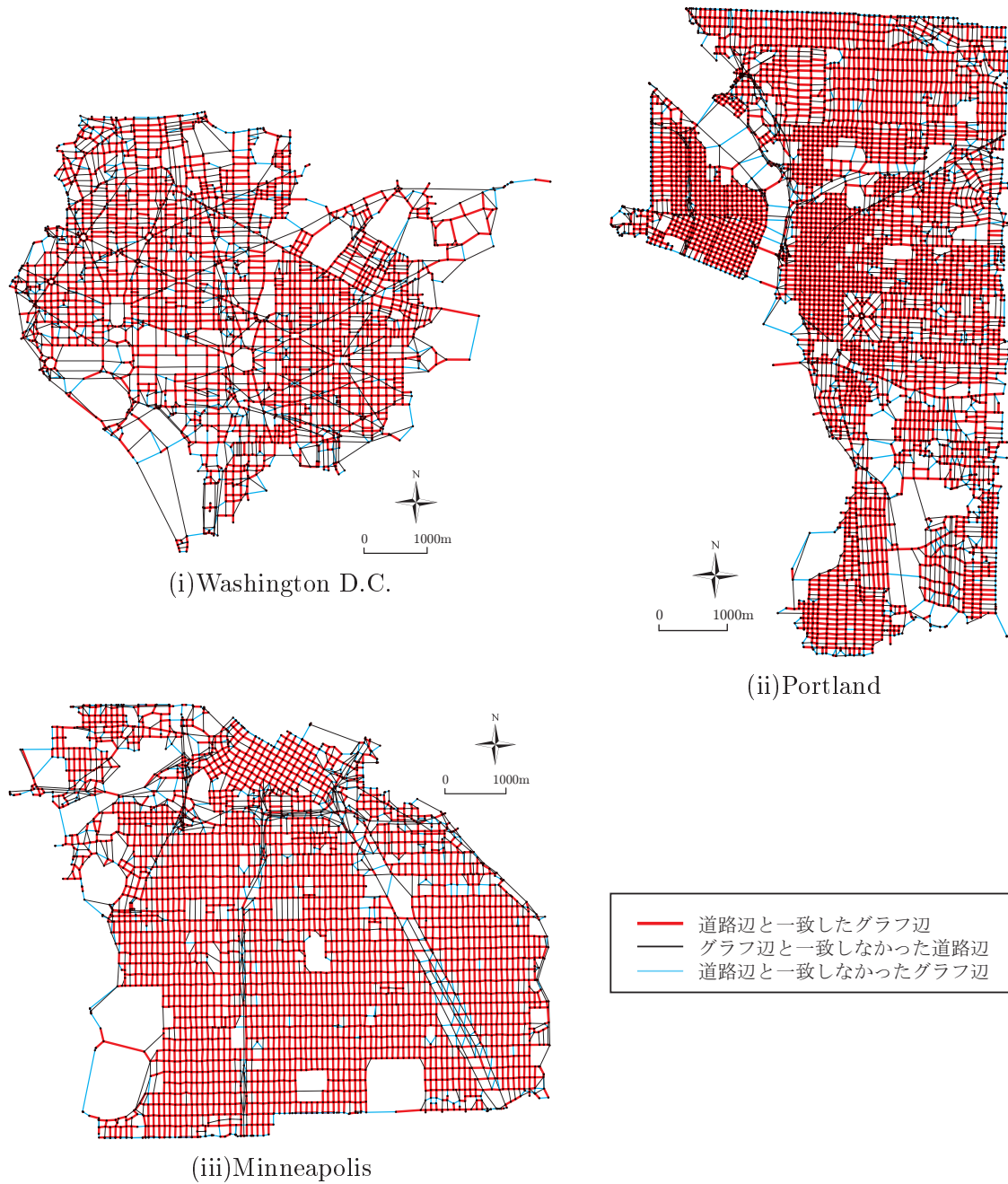


図 3.30: 相対近傍グラフと道路網 (米国都市)

3.6 まとめ

本章では、点間の近接性により構築されるグラフを用いた都市内道路網の形態解析を通じて、模式的道路網パターンとの比較による都市空間における複雑な道路網パターンの構築原理の把握を行った。既存の形態指標（Grid-Tree Proportion, Crossing Factor）を紹介して、上記都市データと各種の規則的道路網との比較を行い指標の性質に関する考察を加えた。各道路が連結されている構成原理として交差点間の近接性に着目し、道路網から道路点を抽出してグラフを構築し、道路辺との重ねあわせによって構築原理を明らかにした。道路網とグラフの関係を明確にするために、一致する辺の数を「構成比率」として定義し、本指標を用いて国内外主要都市の道路網と比較した。これらの分析を通して、相対近傍グラフなど近接グラフによる道路網形態解析の有効性が明らかになった。

その結果、下記のことが明らかになった。

- 規則的点分布におけるグラフにより、都市計画における模式的道路網パターンである各種格子状道路を構築できる。特に代表的な正方格子状道路は、正方格子の点分布における相対近傍グラフ（RNG）により構築することができる。
- つくばセンターでの分析により、格子状道路網で構成される街区において相対近傍グラフで構築できる道路辺が多く見られた。そしてほとんどの区画道路は、ドローネ網（DT）と約97%近くの本数が一致することから、近接性によって道路網が構築できる。一方、幹線道路や地形などでパターンが崩れている部分では、近接性だけでは構築できない道路辺が多く見られた。
- 日本の都市内道路網を用いて、既存の形態指標により、結合性の指標であるGTPによると上野、道路密度の指標であるCFによると名古屋が高く評価された。一方、本章で提案した道路構成比率による都市間比較から、札幌において相対近傍グラフで構築したグラフ辺と一致する割合が高くなり、市街地の区画道路において格子状道路が整備されている都市を評価できた。
- 米国における都市内道路網の分析を行い、既存指標を用いるとNew Yorkが最も高く評価された。そして、道路構成比率の分析から、Denverが相対近傍グラフで構築したグラフ辺と一致する割合が高くなり、格子状道路網が整備されている都市を評価できた。

本章の課題として、主に地図データの扱い方によって結果が異なる可能性があることが挙げられる。まず、道路網が図郭により分断されていることの影響が挙げられる。日本の場合、国土基本図の図葉によって分断されており、外周の図郭交点を含んだ道路点で近接グラフを構築している。一方、米国の場合は、統計区単位によって分断されており、外周の境界線交点を含

んだ道路点でグラフを構築している．同じ面積であっても対象地区の形状により境界線の延長が異なるため，交差点以外の道路点の数も異なってくる．今後は，これらの境界の影響についての考察を行う必要がある．

そして，地図データの縮尺の違いによる影響が挙げられる．今回の分析では，日本は 1:2500，米国は 1:24000 というように異なる縮尺のデータを用いたため，日米での地図データの取得基準（例えば，どのくらい幅員の道路をデータとして取得するか of 基準）が異なる．各種構成比率を用いて，それぞれで得られた近接グラフによる比較を行うことは可能であるが，厳密な意味での実空間との関係を比較しているとは言い難いために，具体的な比較検討を行わなかった．今後は，こうしたデータ取得基準との関係をふまえたグラフ構成方法及び地区間比較の方法の確立が必要である．

さらに，本章の結果を都市・交通計画に適用する際には，道路網の機能分担との関係に注意する必要がある．本章で用いた近接性の概念は，区画道路のような比較的階層の低い道路網の形態解析に有用であることが分かった．一方，幹線道路については，通過交通の処理も目的としており，必ずしも近接性だけで説明できない．都市間など広域交通にも対応した交通計画により整備されているため，その上位計画との対応についても考慮する必要がある．

第4章 移動時間と交通量からみた最適な格子状道路網の形態

4.1 はじめに

第2章において、交通網の整備長と移動距離の関係について考察を行った。そして前章では、近接性によって構築されるグラフを用いた都市内道路網形態の分析により、格子状道路網がある程度整備されていることが明らかになった。そこで本章では、格子状道路網において高速に移動できる交通網の形態について、移動時間と交通量という2つの指標から考察を行う。

交通網の整備水準を論じる場合、通常はネットワーク延長が指標として用いられる。もちろん、対象とする地域の面積が大きいほど、また面積が同じであっても人口が多ければ、交通需要の発生密度も大きくなるので、より多くの交通網が必要であろう。したがって、面積当たり交通網延長（交通網密度）や人口当たり交通網延長によって整備水準を比較することが多い。

高速道路の整備水準については、高速道路総延長を国土面積や人口、自動車保有台数などで除した指標によって国際比較がなされている。我が国のように細長い国土の場合には、面積や交通網の長さなどの条件が同じであっても、輸送距離が長くなり、特定の箇所に混雑が生じるなどのさらに不利な状況が生ずる。したがって、国内の交通輸送需要を処理するための交通網整備水準を議論する際には、領域の形状を考慮する必要があるといえよう。都市レベルでの鉄道や道路の整備水準を議論する場合でも、同様である。都市の形状は地形や水面といった自然条件などによって様々であり、都市鉄道や道路の交通網構造も影響を受けているのが普通である。例えば、函館や神戸など細長い形状を持つ地域では、高規格道路について長辺方向のリンクがより密に整備されている道路パターンを有している。交通網のサービス水準を議論する際、交通網延長や道路率などの面積比率のみで判断するだけでなく、こうした都市の持つ形状的特徴を考慮すべきであると思われる。

このような背景を踏まえ、本章では高速移動できる交通網を「ネットワーク」と定義し、矩形領域に格子状交通ネットワークを与える簡単なモデルを用いて、領域形状と交通網形態によって、同一の交通サービス水準にもたらす影響を明らかにする。交通ネットワークのもたらす交通サービス水準の評価として、平均移動時間と最大通行量に着目し、前者は全体の利便性水準を計る指標として、後者は特定区間の混雑水準を計る指標として考える。ネットワークが稠密にあり、移動には必ずネットワークを利用するという仮定をおくことにより、本質を失う

第4章 移動時間と交通量からみた最適な格子状道路網の形態

ことなく簡便に議論を進める．

本章は下記のように構成される．まず，4.2 節では，格子状ネットワークモデルの説明と仮定について述べ，交通サービス水準として用いる平均移動時間と最大通行量の2つの指標を求める．4.3 節では，各指標を最小化する格子状ネットワークを導出し，それぞれの指標により異なるネットワーク形態となることを示した上で，さらに領域形状がネットワーク必要長に与える影響を指標別に明らかにする．4.4 節では，通行量が移動時間に影響を与える混雑現象を考慮した場合について議論を行い，混雑現象の考慮によりネットワーク形態やネットワーク必要長に与える影響の変化を考察する．

4.2 モデルの概要と交通サービス水準の導出

本章で用いる格子状ネットワークモデルについて，対象領域や交通移動の仮定などを説明する．そして，交通サービス水準として用いる二つの指標（最大通行量，平均移動時間）の定式化を行う．

4.2.1 モデルの概要

格子状ネットワークモデルについて，図4.1に領域と移動の概要を示す．長辺 a ，短辺 b ($a \geq b$) である矩形領域（面積 $S = ab$ ）に，横方向 x ，縦方向 y の座標系をとる．高速に移動できるネットワークを， x 方向に I 本， y 方向に J 本を等間隔に配置するモデルを考える．ネットワークの交差する点を「ノード」，その区間を「リンク」と呼ぶ．

交通需要の発生や領域内での移動について，以下の仮定をおく．

- a) 居住人口は P であり，単位時間に1人1トリップ発生するものとする（一般性は失われな

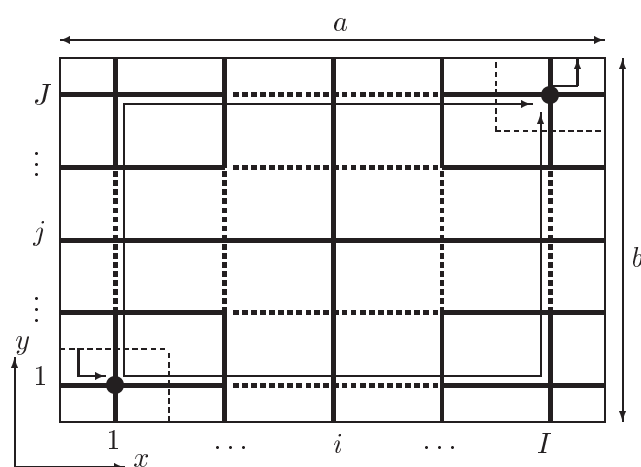


図 4.1: 領域と移動の概要

4.2. モデルの概要と交通サービス水準の導出

い) . よって , 全トリップ数は P となる . 交通需要が発生・集中とも均等であるとし , 発生と集中が独立であり , 分布交通量も一様であるとする .

- b) 移動経路は図 4.2 のように , 格子点を中心とする矩形領域のゾーンを単位に , このゾーン内で発生・集中する交通は必ずそのゾーンの格子点を経由する .
- c) ゾーン内では , 図 4.3 のように格子状道路網が稠密に整備されており , 格子点までは移動速度 1 で , 直交距離 (Rectilinear 距離) に従って移動する .
- d) ネットワーク上では , 全ての移動は最短経路を選択し , 一回だけ方向転換する 2 経路に均等に交通量を配分する .
- e) ネットワーク上では , 速度 $v (>1)$ でゾーン内よりも高速に移動できる .

以降の分析では , ネットワーク上速度 v , 領域面積 S は与えられているものとし , 下記のパラメータにより交通サービス水準の定式化を行う . 領域形状として , xy 方向の領域の長さの比率である「領域形状比率」は , $N = b/a$ とする . ネットワークの形態として , xy 方向のネットワークの本数の比率である「ネットワーク本数比率」は $M = J/I$ とする . 領域全体のネットワークの長さの総和である「ネットワーク長」は , $W = aJ + bI$ とする .

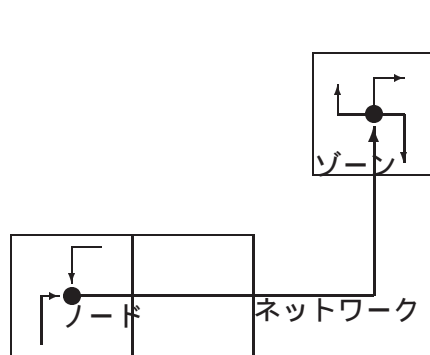


図 4.2: ゾーン間移動の概要

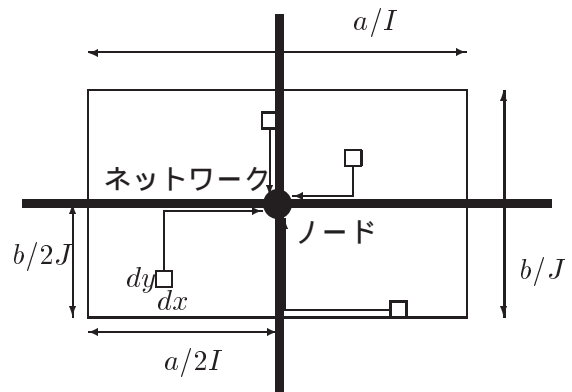


図 4.3: ゾーン内移動

4.2.2 最大通行量

通行量とは , リンク上を通行するトリップ数の総和であり , 領域内でのリンクごとの通行量の分布によって混雑水準を測る指標である . 最大通行量によって , 通行量の最大値となる区間が特定され , 交通流の集中度合いが分かる .

第4章 移動時間と交通量からみた最適な格子状道路網の形態

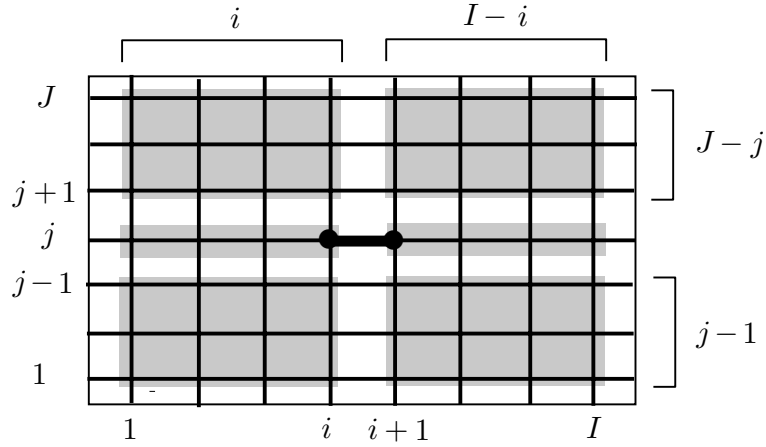


図 4.4: $(i, j)(i+1, j)$ 間のリンクを通行する OD ペア

まず, x 方向のリンクについて考える. ノード (i, j) と $(i+1, j)$ を結ぶリンクは, 図 4.4 の領域①↔④, ③↔②, ③↔④, ④↔⑤, ⑥↔③ のペアが通過する. よって, 通行量 $q_{i,j}^x$ は, トリップ数 $P/(IJ)^2$ を考慮すると,

$$\begin{aligned} q_{i,j}^x &= \frac{P}{(IJ)^2} \{2(J-j)i(I-i) + 2(j-1)i(I-i) + 2i(I-i)\} \\ &= \frac{2P}{I^2J} i(I-i) \quad (i = 1, \dots, I-1) \end{aligned} \quad (4.2.1)$$

のようになる. これは j によらないので, 改めて q_i^x と表すことにする. 式 (4.2.1) は I が十分大きく i を連続量と見なせるとすれば, i で微分することにより極値が求まるので,

$$\begin{aligned} \frac{dq_i^x}{di} &= \frac{P}{(IJ)^2} (I-2i) \\ &= 0 \end{aligned}$$

を i について解くと, $i = I/2$ の時に最大となる. つまり, 領域の中央部が一番通行量が大きいたことが分かる.

y 方向も同様にして, (i, j) と $(i, j+1)$ を結ぶリンクの通行量 q_j^y は, $j = J/2$ の時に最大となる.

したがって, 各方向での最大通行量 q^+ は,

$$q^{x+} = \frac{P}{2J} \quad (4.2.2)$$

$$q^{y+} = \frac{P}{2I} \quad (4.2.3)$$

となる. x, y 方向ともに, 最大通行量はその方向のリンク本数によって決まる.

4.2.3 平均移動時間

平均移動時間とは、領域内から発生するすべての移動について1トリップ当たりの移動時間の平均であり、移動全体から見た交通ネットワークの利便性を測る指標である。

まず、各リンクでの総移動時間は、各リンクの長さを速度 v で除すことにより移動時間が求まり、それに通行量を掛け合わせるにより求まる。これを x 方向と y 方向それぞれで、全リンクについて足し合わせるにより、ネットワーク上での総移動時間が求まる。よって、ネットワーク上での総移動時間 T_{nw} は、速度 v で移動し、リンク長は x 方向が a/I 、 y 方向が b/J であることから、

$$\begin{aligned} T_{nw} &= J \sum_{i=1}^{I-1} \frac{1}{v} \frac{a}{I} q_i^x + I \sum_{j=1}^{J-1} \frac{1}{v} \frac{b}{J} q_j^y \\ &= \frac{P}{3v} \left(a + b - \frac{a}{I^2} - \frac{b}{J^2} \right) \end{aligned} \quad (4.2.4)$$

となり、 I, J が十分大きい場合は、

$$T_{nw} \simeq \frac{P}{3v} (a + b) \quad (4.2.5)$$

のように近似することができる。

ゾーン内での総移動時間 T_{in} は、図 4.3 のようにノードから (x, y) の距離にあるゾーン内の微小領域の人口 $P dx dy / S$ がノードへ速度 1 で移動し、全ノード数 IJ 、発生・集中の両方を考慮すると、

$$\begin{aligned} T_{in} &= 2IJ \int_{-\frac{b}{2J}}^{\frac{b}{2J}} \int_{-\frac{a}{2I}}^{\frac{a}{2I}} (|x| + |y|) \frac{P}{S} dx dy \\ &= \frac{P}{2} \left(\frac{a}{I} + \frac{b}{J} \right) \end{aligned} \quad (4.2.6)$$

となる。

故に、平均移動時間 T は、式 (4.2.5) と式 (4.2.6) の和を総トリップ数で除すことにより得られ、ネットワーク本数が I, J とともに十分に大きい場合には、

$$\begin{aligned} T &= \frac{T_{in} + T_{nw}}{P} \\ &\simeq \frac{1}{2} \left(\frac{a}{I} + \frac{b}{J} \right) + \frac{1}{3v} (a + b) \end{aligned} \quad (4.2.7)$$

と近似することができる。

4.3 交通サービス水準による最適な格子状ネットワーク形態

前節で求めた交通サービス水準について，それぞれを最小化する格子状ネットワークを導出し，領域形状比率 N の変化により同水準のサービス水準をもたらすために必要なネットワーク長 W を求める．

4.3.1 平均移動時間を最小にするネットワーク形態

平均移動時間 T をネットワーク本数比率 $M(= J/I)$ と領域形状比率 $N(= b/a)$ で表現すると，式 (4.2.7) より，

$$T \simeq \frac{(M+N)^2 S}{2M N W} + \frac{1+N}{3v} \sqrt{\frac{S}{N}} \quad (4.3.1)$$

となる．

所与のネットワーク長 W に対して，平均移動時間 T を最小にするような I, J の組み合わせを求める問題を考えると，

$$\min_{I, J} T \quad \text{s.t. } W = aJ + bI \quad (4.3.2)$$

のようになる．

ラグランジュの未定乗数法により，ラグランジュ関数 \mathcal{L} を

$$\mathcal{L} = T - \lambda \{W - (aJ + bI)\}$$

のように設定する．そして， \mathcal{L} を I, J, λ のそれぞれで微分し，その値が 0 になるような極値を求めることにより，

$$\frac{a}{I} = \frac{b}{J} \quad (4.3.3)$$

という関係が満たされ，領域形状とネットワーク本数の比率には， $M = N$ の関係が満たされていることがわかる．

つまり， x 方向と y 方向のリンク長が等しくなるようなネットワーク形状，すなわち図 4.5 のような「正方格子状ネットワーク」である場合に，平均移動時間が最小になることが分かった．

数値例として，矩形領域（領域形状比率 $N=0.5$ ，面積 $S=1$ ）において $v=2$ の場合を考える．図 4.6 のように，平均移動時間 T はネットワーク長 W が同じでもネットワーク本数比率 M によって変化する．このとき，ネットワーク長によらず， $M=N=0.5$ のときに平均移動時間 T が最小になることが確認された．

正方格子状ネットワークであるときの平均移動時間 T_{SG} は，式 (4.3.1) より N, W を用いると，

$$T_{\text{SG}} \simeq \frac{2S}{W} + \frac{1+N}{3v} \sqrt{\frac{S}{N}} \quad (4.3.4)$$

4.3. 交通サービス水準による最適な格子状ネットワーク形態

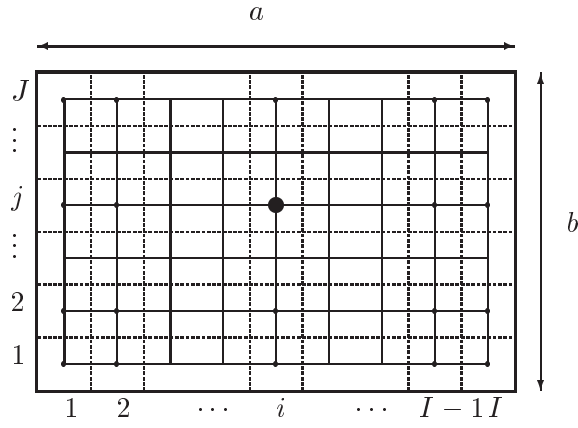


図 4.5: 正方格子状ネットワークの概要

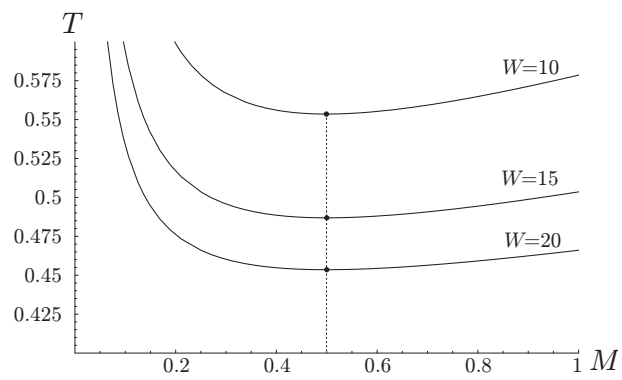


図 4.6: ネットワーク本数比率 M による平均移動時間 T の変化

第4章 移動時間と交通量からみた最適な格子状道路網の形態

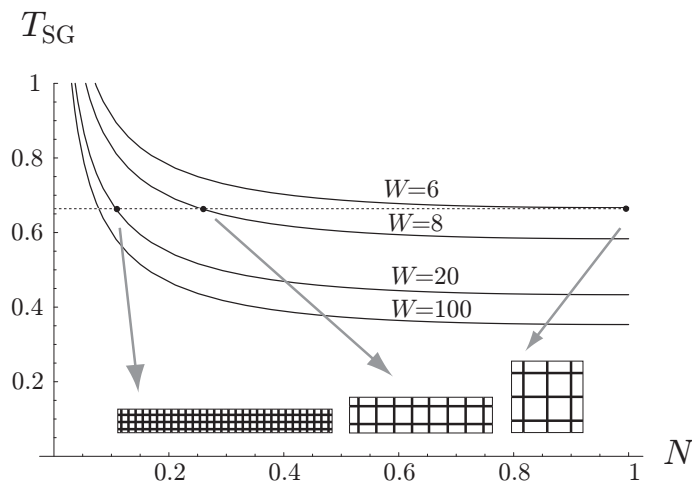


図 4.7: 領域形状比率 N による平均移動時間 T_{SG} の変化

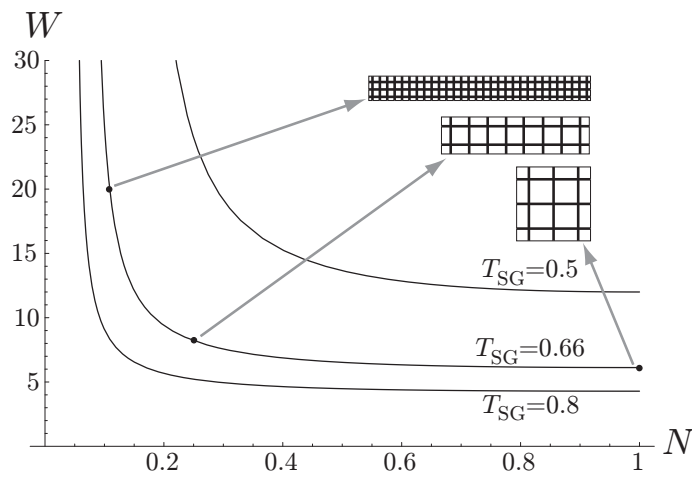


図 4.8: 領域形状比率 N による平均移動時間 T_{SG} を一定とするネットワーク長 W の変化

4.3. 交通サービス水準による最適な格子状ネットワーク形態

となる．式 (4.3.4) について，面積 $S=1$ ，速度 $v=2$ のとき，領域形状比率 N とネットワーク長 W を変化させると，平均移動時間 T_{SG} は図 4.7 のようになる．平均移動時間 $T=0.66$ となるために必要なネットワーク長は，領域形状比率 N が小さくなる，つまり領域形状が細長くなるにつれて長くなる．

このように，領域形状が細長くなるほど，同じだけのネットワーク長があっても移動時間が多くかかる．ネットワークが長く整備されたとしても，領域形状の違いによる移動時間の格差は変わらない．また，細長いとどんなにネットワークを整備しても到達できる移動時間の水準には限界がある．

また，領域形状比率 N を変化させたときに平均移動時間 T_{SG} を同水準にするために必要なネットワーク長 W は，

$$W^* = \frac{2S}{T_{SG} - L/6v} \quad (4.3.5)$$

となり，図 4.8 のようになる．このように，移動時間を同水準にするためには，領域が細長くなる，あるいはより短時間での移動が求められるほど，ネットワーク長をますます長くしなければならない．

4.3.2 最大通行量を最小にするネットワーク形態

最大通行量 q^+ を，ネットワーク本数比率 $M(= I/J)$ と領域形状比率 $N(= b/a)$ で表現すると，式 (4.2.2)，式 (4.2.3) より

$$q^{x+} = \frac{P(M+N)}{2W} \sqrt{\frac{S}{N}} \quad (4.3.6)$$

$$q^{y+} = \frac{P(M+N)M}{2W} \sqrt{\frac{S}{N}} \quad (4.3.7)$$

となる．所与のネットワーク長 W に対して，最大通行量 q^+ を最小にするような I, J の組み合わせを求める問題を考えると，

$$\min_{I,J} \max\{q^{x+}, q^{y+}\} \quad \text{s.t. } W = aJ + bI \quad (4.3.8)$$

のようになる．ここで，最大通行量は各方向で式 (4.2.2) と式 (4.2.3) より I, J について単調減少であるので，それぞれが等しいときに最大通行量が最小になる．このとき，

$$I = J \quad (4.3.9)$$

という関係が満たされ，ネットワーク本数比率 $M = 1$ が成り立つことがわかる．つまり， x 方向と y 方向のリンクの本数が等しくなるようなネットワーク形状，すなわち図 4.9 のような「相似格子状ネットワーク」である場合に，最大通行量が最小になることが分かった．

第 4 章 移動時間と交通量からみた最適な格子状道路網の形態

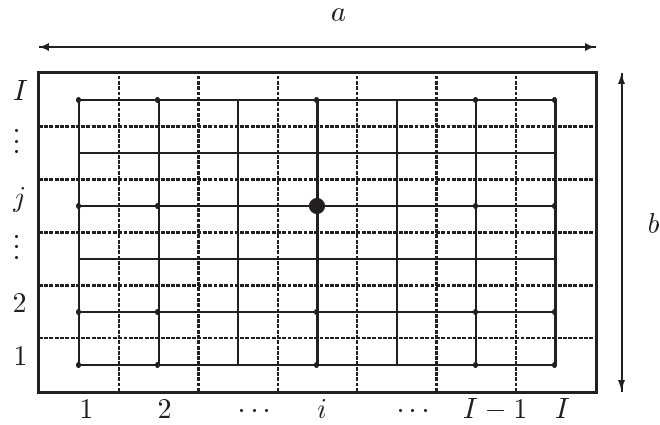


図 4.9: 相似格子状ネットワークの概要

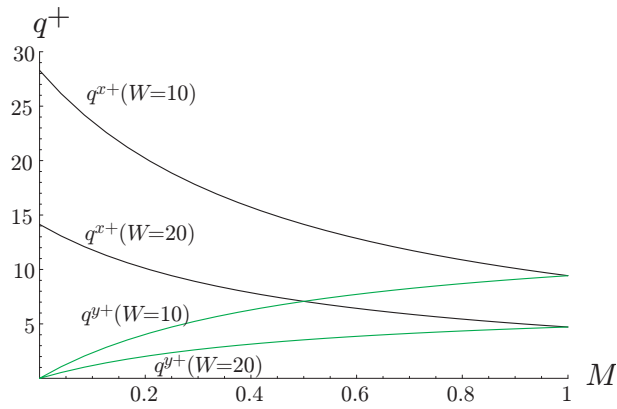


図 4.10: ネットワーク本数比率 M による最大通行量 q^+ の変化

4.3. 交通サービス水準による最適な格子状ネットワーク形態

数値例として、領域形状比率 $N=0.5$, 面積 $S=1$ である矩形領域において、人口 $P=1$ である場合を考えると、最大通行量 q^+ は、ネットワーク長 W が同じでもネットワーク本数比率 M によって図 4.10 のように変化する。このとき、ネットワーク長によらず、ネットワーク本数比率 $M=1$ のときに両方向の最大通行量 q^+ が同値になっている。

相似格子状ネットワークであるときの最大通行量 q_{RG}^+ は、式 (4.3.6) より N, W を用いると、

$$q_{RG}^+ = \frac{P(N+1)}{2W} \sqrt{\frac{S}{N}} \quad (4.3.10)$$

となる。式 (4.3.10) について、面積 $S=1$, 人口 $P=1$ のとき、領域形状比率 N とネットワーク長 W を変化させると最大通行量 q_{RG}^+ は図 4.11 のようになる。領域形状比率 N が小さくなる、つまり領域形状が細長くなるに連れて、最大通行量 q_{RG}^+ を一定とするために必要なネットワーク長は長くなる。しかし、その程度は前節の平均移動時間の場合ほど増加はしない。

このように、細長くなるほど最大通行量は大きくなるが、ネットワーク長 W を長くしてネットワークを整備することにより、この増加を抑えることができる。また、細長くてもネットワークを整備することにより、到達できる最大通行量の水準に限界がない。

領域形状比率 N を変化させたとき、最大通行量 q_{RG}^+ を同水準にするために必要なネットワーク長 W は図 4.12 のようになる。

このように、最大通行量を同水準にするためには、それほどネットワーク長を多く必要としない。しかし、水準が高くなると、細長くなるほど必要となるネットワーク長の格差が大きくなる。

本節の分析から、細長い領域形状の不利を克服するために必要なネットワーク長は、平均移動時間水準を同じにする場合より最大通行量水準を同じにする場合の方が短くてすむことが分かる。

第4章 移動時間と交通量からみた最適な格子状道路網の形態

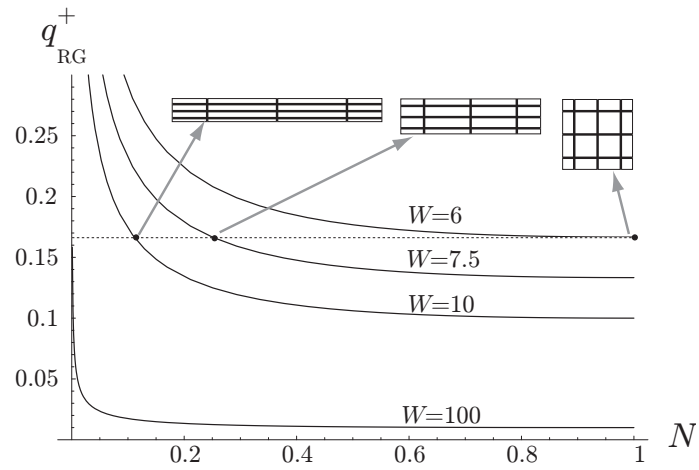


図 4.11: 領域形状比率 N による最大通行量 q_{RG}^+ の変化

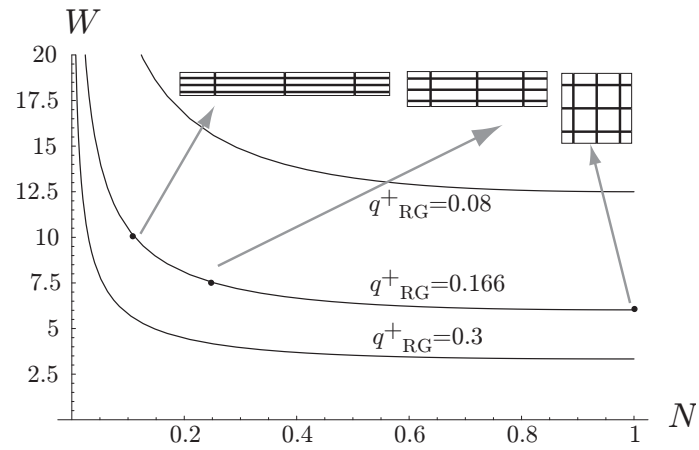


図 4.12: 領域形状比率 N による最大通行量 q_{RG}^+ を一定とするネットワーク長 W の変化

4.4 混雑現象を考慮した場合

前節までネットワーク上の速度を一定と仮定したが、実際には通行量が増えるにつれて移動速度が減少するという混雑現象が発生する。そこで、ネットワークに「通行容量」を設定して、4.2 節で説明した仮定 e) のみ、以下のように変更して同様の分析を行う。なお、混雑現象を考慮するのはネットワークを利用するゾーン間移動のみで、ゾーン内移動においては混雑現象は発生しないものとする。

e') ネットワークの総通行容量を一定として、ネットワーク総延長が長くなるとリンクの単位長さ当たりの容量が小さくなるという条件で、移動速度と通行量の関係を設定する。

ネットワーク全体の総通行容量 C は、式 (4.2.5) より領域内でのネットワーク上の総移動距離 $P(a+b)/3$ で与えられるとする。長さ当たりの通行容量 k は $C = kW$ の関係が満たされると考えると、

$$k = \frac{P(a+b)}{3(aJ+bI)} \quad (4.4.1)$$

となる。このような通行容量のパラメータ k について、通行量 q における速度を $v = Vk/q$ と定義するとき

$$v = \frac{P(a+b)V}{3(aJ+bI)q} \quad (4.4.2)$$

となる。ただし、通行量 q が通行容量 k に等しいときの速度を基準速度 V とする。通行量が増加すると速度低下をする関係を図示すると、図 4.13 のようになる。

混雑を考慮しても最大通行量は変化しないので、以下、平均移動時間を最小にする場合のみ考える。ここで、交通計画における四段階推計法における $q-v$ 曲線との違いを明確にする。配分交通量の計算において、混雑が生じると速度低下をする場合、通行量が単位時間当たりの数値が用いられるために、総通行量が減少することが考慮されている。しかし本節のモデルでは、単位時間の概念がないため、速度が変化しても総通行量は変化しない。

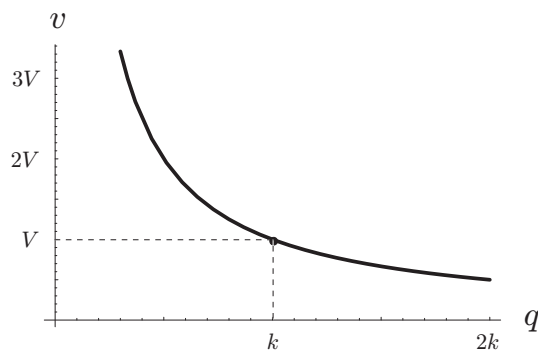


図 4.13: 通行量 q と速度 v の関係

第4章 移動時間と交通量からみた最適な格子状道路網の形態

4.4.1 混雑を考慮した平均移動時間

混雑を考慮したネットワーク全体の総移動時間 T_{nw}^C は、混雑を考慮しない場合の式 (4.2.5) を導出したときと同じ作法で求めることができる。

まず、各リンクでの総移動時間は、各リンクの長さを速度 v で除すことにより移動時間が求まり、それに通行量を掛け合わせるにより求まる。これを x 方向と y 方向それぞれで、全リンクについて足し合わせるにより、ネットワーク上での総移動時間が求まる。よって、ネットワーク上での総移動時間 T_{nw} は、速度 v は式 (4.4.2) を代入し、リンク長は x 方向が a/I 、 y 方向が b/J であることから、

$$\begin{aligned} T_{nw}^C &= J \sum_{i=1}^{I-1} \frac{1}{v} \frac{a}{I} q_i^x + I \sum_{j=1}^{J-1} \frac{1}{v} \frac{b}{J} q_j^y \\ &= \frac{2P(aJ + bI)}{5(a+b)V} \left(\frac{a}{J} + \frac{b}{I} - \frac{a}{I^4J} - \frac{b}{IJ^4} \right) \end{aligned}$$

となり、 I, J が十分大きい場合は、

$$T_{nw}^C \simeq \frac{2P(aJ + bI)}{5(a+b)V} \left(\frac{a}{J} + \frac{b}{I} \right) \quad (4.4.3)$$

のように近似することができる。

故に、平均移動時間 T^C は、混雑を考慮したネットワーク総移動時間の式 (4.4.3) と混雑によらず一定なゾーン内総移動時間の式 (4.2.6) の和を総トリップ数で除すことにより得られ、ネットワーク本数が I, J とともに十分に大きい場合は、

$$\begin{aligned} T^C &= \frac{T_{in} + T_{nw}^C}{P} \\ &\simeq \left(\frac{a}{I} + \frac{b}{J} \right) \left\{ \frac{1}{2} + \frac{2(aI + bJ)}{5(a+b)V} \right\} \end{aligned} \quad (4.4.4)$$

と求まる。

4.4.2 混雑を考慮した平均移動時間を最小にするネットワーク形態

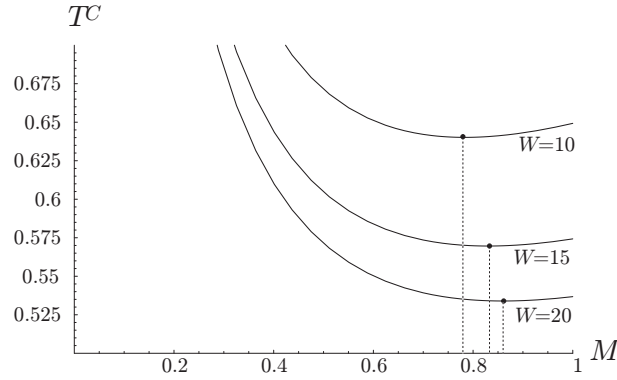
平均移動時間 T^C を、式 (4.4.4) からネットワーク本数比率 M と領域形状比率 N で表現すると、

$$T^C \simeq \frac{(M+N)^2 S}{2MNW} + \frac{2(M+N)(MN+1)}{5(1+N)MV} \sqrt{\frac{S}{N}} \quad (4.4.5)$$

のようになる。

所与のネットワーク長 W に対して、平均移動時間 T^C を最小にするようなネットワーク本数 I と J の組み合わせを求める問題を考えると、

$$\min_{I,J} T^C \quad \text{s.t. } W = aJ + bI \quad (4.4.6)$$

図 4.14: ネットワーク本数比率 M による平均移動時間 T^C の変化 (混雑)

のようになる．ラグランジュ関数の未定乗数法により，最小となる条件は

$$\frac{1}{2ab} \left(\frac{a}{I} - \frac{b}{J} \right) = \frac{2}{5(a+b)V} \left(\frac{I}{J} - \frac{J}{I} \right)$$

である．領域形状比率 N によってネットワーク本数比率 M がどのようなになるのかを表すために，上式を前節と同じように領域形状比率 N を用いて表すと，

$$M = \sqrt{\frac{5(1+N)N^2\sqrt{SV} + 4NW\sqrt{N}}{5(1+N)\sqrt{SV} + 4NW\sqrt{N}}} \quad (4.4.7)$$

となる．このように，混雑を考慮することにより，ネットワーク長 W が比率 M と N の関係にも影響を及ぼし，ネットワーク長 W によって最適となるネットワーク形態が変化することが分かる．

数値例として，矩形領域（領域形状比率 $N=0.5$ ，面積 $S=1$ ）において，基準速度 $V=2$ である場合を考える．平均移動時間 T^C は，同じネットワーク長 W でもネットワーク本数比率 M によって図 4.14 のように変化する．そして，平均移動時間 T^C を最小にするネットワーク本数比率 M は，ネットワーク長 W によって異なることが分かる．

上記の矩形領域の条件（ $S=1$, $V=2$ ）において，ネットワーク長 W を変化させると，比率 M と N の関係は図 4.15 のようになる．このように，混雑現象を考慮した場合の平均移動時間を最小にするネットワーク形態は，正方格子状と相似格子状の中間のネットワークにおいて最適になることが分かった．

ネットワーク長 W が十分大きくなる（ネットワークが整備される）に連れて最適なネットワーク本数比率は $M=1$ に近づく．つまり，混雑を考慮した場合は，ネットワークが長くなるほど，相似格子状ネットワークに近い形態が平均移動時間を小さくすることがわかる．

そこで，ネットワークが稠密にあるということを考え，相似格子状ネットワークを前提としたとき，混雑を考慮した場合の平均移動時間 T_{RG}^C は，式 (4.4.5) から N, W を用いると，

$$T_{RG}^C \simeq \frac{(N+1)^2 S}{2NW} + \frac{2(N+1)}{5V} \sqrt{\frac{S}{N}} \quad (4.4.8)$$

第4章 移動時間と交通量からみた最適な格子状道路網の形態

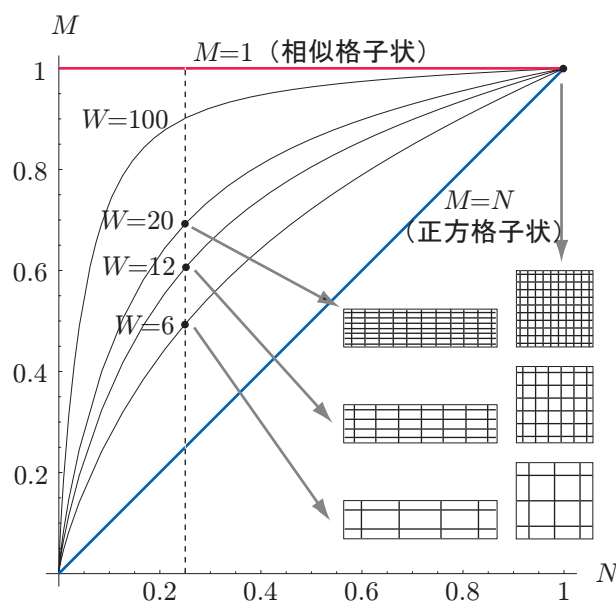


図 4.15: 領域形状比率 N による平均移動時間 T^C を最小にするネットワーク本数比率 M の変化 (混雑)

のようになる。

この場合に、上記の矩形領域 ($S=1, V=2$) において、ネットワーク長 W と領域形状比率 N を変化させたときの平均移動時間 T_{RG}^C は、図 4.16 のようになる。正方形領域 ($N=1, I=J=3$) と比較すると、平均移動時間 $T_{RG}^C=0.73$ となるために領域形状比率 N が小さくなる、つまり領域形状が細長くなるにほど必要なネットワーク長は長くなる。

混雑がない場合の正方格子状ネットワークである図 4.7 における平均移動時間 $T_{SG}=0.66$ である曲線と比べても、細長くなるほど同じネットワーク長でも移動時間がより多くかかることがわかる。そして、ネットワークを稠密にして到達できる移動時間の下限が大きくなる。

また、上記の矩形領域の条件 (領域面積 $S=1$, 基準速度 $V=2$) において、領域形状比率 N を変化させたとき、平均移動時間 T_{RG}^C を同水準にするために必要なネットワーク長 W は図 4.17 のようになる。このように、移動時間を同水準にするためには、混雑がない場合の正方格子状ネットワークである図 4.8 と比べても、その水準が高くなるほど必要なネットワーク長がますます多くなる。

本節の分析から、混雑を考慮する場合には、領域形状が細長くなるほど、平均移動時間の意味での移動の不利がさらに大きくなることが分かる。

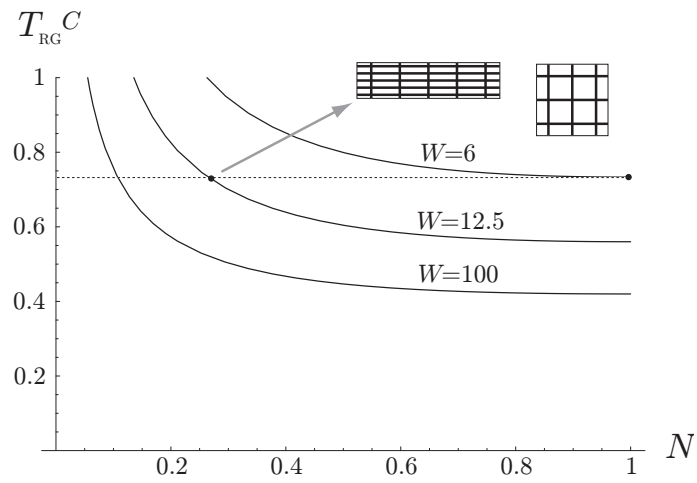


図 4.16: 領域形状比率 N による平均移動時間 T_{RG}^C の変化 (混雑)

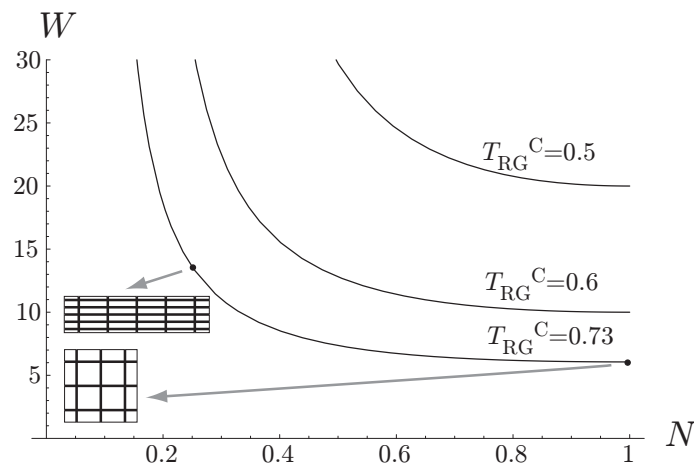


図 4.17: 領域形状比率 N による平均移動時間 T_{RG}^C を一定にするネットワーク長 W の変化 (混雑)

4.5 まとめ

本章では、矩形領域内における高速移動できる格子状道路ネットワークを等間隔に配置するモデルの定式化を行った。交通サービス水準として、全体の移動利便性を表す平均移動時間と特定区間の混雑水準を表す最大通行量という2つの評価指標を設定し、領域形状の形状比率とネットワーク本数比率、ネットワーク長により、それぞれの基準から見た領域形状の違いによる最適な格子状道路網の形態を導出した。

その結果、下記のことが明らかになった。

- 平均移動時間を基準にした場合、全てのリンクが同じ長さとなる正方格子状ネットワークが最適な形態となる。平均移動時間を同一水準にするためには、領域形状が細長くなるほど、より長いネットワーク必要である。そして、細長い領域では、どんなに長くしても到達できない水準が存在する。
- 最大通行量を基準にした場合は、領域形状と比例した配置となる相似格子状ネットワークが最適な形態となる。最大通行量を同一水準にするためには、領域形状が細長くなるほど、より長いネットワークが必要となるが、平均移動時間の場合ほど長いネットワークは必要としない。
- 通行量により移動時間が変化する混雑現象を考慮することにより、平均移動時間を最小にするネットワーク形態は、正方格子状ネットワークと相似格子状ネットワークの中間の形態になる。ネットワーク長が長いほど、相似格子状ネットワークに近い形態となることから、最大通行量を少なくすることが目的となる。平均移動時間を同水準にするには、混雑がない場合と比べて細長くなるほど、より長いネットワークが必要になる。

本章では、領域形状とネットワークの配置、移動経路選択、移動需要などに強い仮定を置いている。そこで、本章の結果を現実の道路網における分析へ拡張するためには、以下のような問題が残されている。

まず、領域形状が矩形であり、幹線道路を想定した高速のネットワーク移動も区画道路を想定した低速のゾーン内移動も、格子状道路網であることを仮定した。そこで、領域形状とネットワーク形状の一般化が、実際の境界線や道路網のような複雑な形状でも、本研究で得られたような結論が成立するかどうかについての検証も望まれる。

経路選択については、必ずノードを経由し、ゾーン間はネットワークを利用して移動することを仮定している。

さらに、ネットワーク密度や需要分布が一様であることに対して、ネットワークの密度（間隔、延長など）を領域内での位置で変えることができ、領域内で一様な移動だけでなく中心への交通需要の集中なども考慮し、実際の移動を視野に入れた分析を行う必要がある。

第5章 輸送システムにおける最適な中継施設の階層構造

5.1 はじめに

前章では、高速と低速の2階層の交通ネットワークを想定して、格子状道路における高速交通ネットワークの形態について考察してきた。本節では、複数階層で構成されている輸送システムへと拡張し、さらに輸送に関係する費用から見た輸送中継施設の最適な階層構造について考察を行う。

都市内で人や物を運ぶときに、最短距離で運んだ方が輸送にかかる時間や費用を短くすることができる。しかし、現実の輸送を見ても分かるように、運ぶ物の特性や輸送機関の進歩に応じて、多少遠回りして運ぶこともある。この状況を説明するために、ある領域内に存在する点から、一点への輸送需要がある場合を考える。図5.1にあるように、左のように目的地に直通する輸送に対し、右のように輸送を中継する施設に一旦まとめてから集めて運ぶことにより「階層的輸送」が生じる。階層的輸送を行うために、輸送の結節点となる施設を「輸送中継施設」と呼ぶこととする。移動する際にかかる時間や費用を「輸送費用」として一括して考えることとする。

例えば、郵便輸送における輸送の概要は、図5.2のように地域間輸送と地域内輸送に大きく分けられ、その結節点である輸送中継施設が地域区分局である。地域間輸送においては、主に地域区分局間を高速道路などを利用して、大型の輸送機材で長距離の直行輸送が行われている。一方、地域内輸送においては、主に地域区分局管内の集配局を比較的小型の輸送機材で巡回輸送が行われている。収集輸送は収集と呼ばれ、まず集配局に集められ自局内郵便物とそれ以外

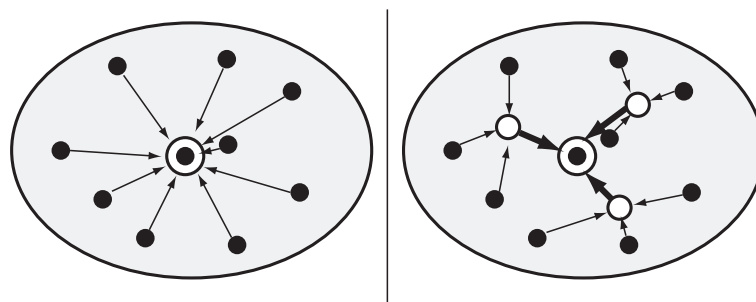


図5.1: 階層的輸送

第5章 輸送システムにおける最適な中継施設の階層構造

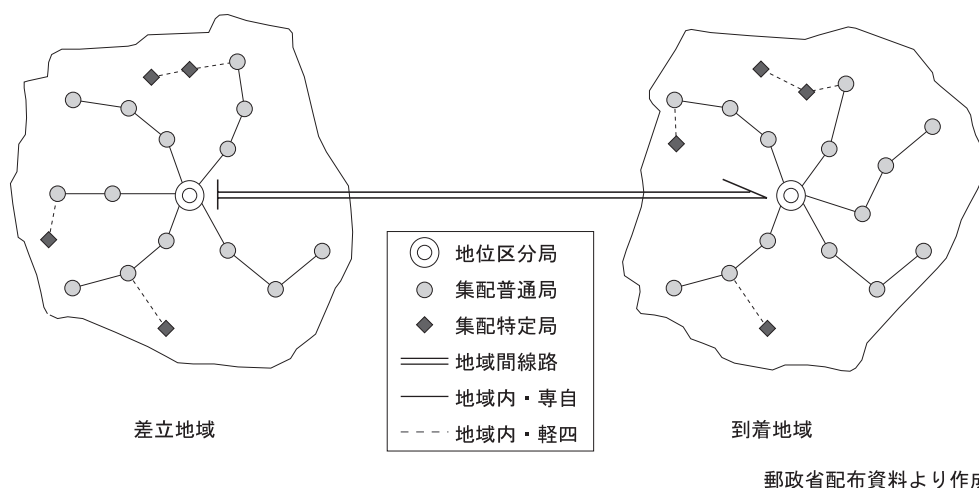


図 5.2: 郵便輸送における階層的輸送の概要

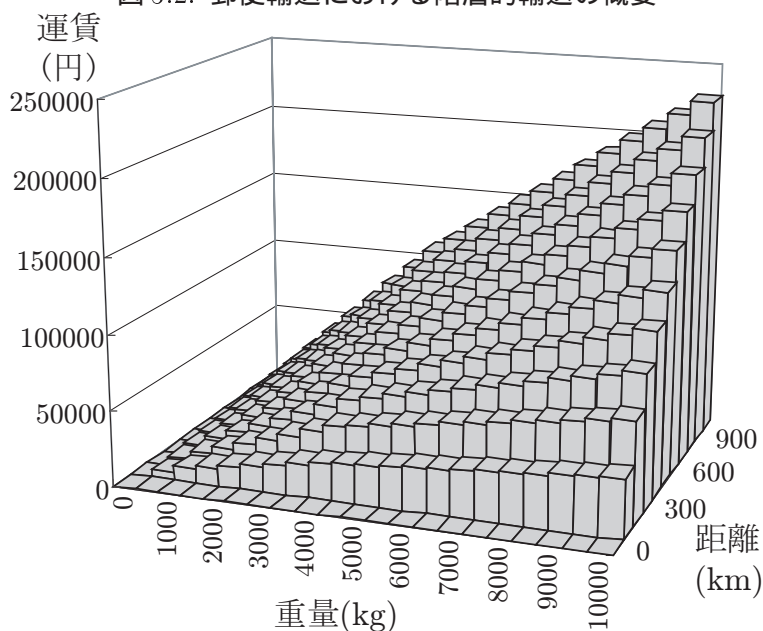


図 5.3: 一般路線貨物自動車運送事業運賃料金

に区分され、地域区分局へ輸送される。配送輸送は配達と呼ばれ、地域区分局より集配局へ輸送され、集配局においても輸送中継施設として積み替えが行われ各配達先へ輸送されている。

[小倉(1999)]において、輸送費用には長距離逓減・重量逓減といった「規模の経済性」があり、輸送ネットワークの拡大には需要の増加が重要な要因になっている。そして、運ぶ物や車両の特性を考慮した上で望ましい集配施設の密度として警察署の密度を目標として、宅配便の全国的な展開に際して階層構造を持つ輸送ネットワークの構築を行った。しかし、この数値は宅配便輸送についての筆者の永年に渡る経験から設定されたものであり、輸送品目による施設密度についての定量的な議論はなされていない。

輸送費用の例として、一般路線貨物自動車運送事業運賃料金(1989年)では図5.3のように、

2kg からの各重量帯・50km 毎各距離帯毎に基準運賃が規定されており、1000km,1000kg 以上の場合には基準運賃率が定められている。これらの運賃は、輸送量が大量であり、輸送距離が長距離になるほど割引率が高くなっている。物流の輸送に関する費用である運賃には、規模の経済性を考慮するために、輸送量と輸送距離のべき関数で表すこととする。

階層的輸送システムにおいて、「輸送中継施設」にて積み替えを行い、上位階層へ収集（あるいは下位階層へ配送）されて、目的地へ輸送される。そして、輸送費用に規模の経済性が存在する場合に、総輸送費用が最小という意味での最適な輸送階層数と階層別施設数を求め、規模の経済性を表すパラメータの変化と需要密度の増加による影響について考察する。さらに、輸送費用を最小化とする階層システムに対し、施設数の増加に伴う費用である施設費用を考慮した場合、施設間の移動経路パターンの異なる場合との比較を行う。その際、施設数、階層数が近似的に連続量であると仮定することにより、大幅に計算の制約を緩和することができ、大規模な問題についても対応することが可能となる。

本章は以下のように構成される。まず 5.2 節では、本研究の分析に用いるための道具としての、施設数、階層数が連続量であるとした連続的階層輸送モデルを構築する。一様な輸送需要が連続的に密に存在し、輸送費用に規模の経済性が存在することを仮定する。直線距離で移動する一次元都市、領域形状が多角形や円である二次元都市の場合、直交距離で移動する二次元都市の場合について、それぞれ輸送費用を定式化する。5.3 節において、輸送費用を最小化するような最適な輸送階層数・施設数とそのときの輸送費用を解析的に導出する。この結果を 5.4 節において、規模の経済性や需要密度といったパラメータが、階層構造へ与える影響について比較する。5.5 節において輸送費用だけでなく施設費用も考慮した場合、5.6 節において巡回移動を考慮した場合について、階層構造にどのような変化が生じるのかを考察する。最後に 5.7 節において、現実の階層的輸送システムについて、規模の経済性のパラメータを輸送費用より推計し、各国の小包輸送における階層構造の特性について考察する。

5.2 モデルの概要と輸送費用の定式化

本節では、分析で用いる階層輸送システムに関する概要を説明する。交通需要や移動に関する仮定と輸送費用のモデル化を行い、領域形状や集配経路の違いによる輸送費用を導出する。

5.2.1 モデルの概要

モデルの仮定

交通需要の発生や領域内での移動について、以下の仮定をおく。

- 最下階層の施設 n_0 個（輸送需要と考える）が一様に分布しており、 n_M 個の最上階層施設へ運ぶ需要が一様に発生するものとする（many-to-one demand）。つまり、1つの最上階層施設に割り当てられる需要量は、 $\frac{n_0}{n_M}$ 個となる。なお、中間階層で需要が増加することはない、階層間の施設の関係はサービスが排他的（successively exclusive）であるとする。
- 各輸送需要の移動については、図5.4のような M 階層輸送を経て最上階層に到着することを考える。施設間は無停車で移動し、直行型移動（Single Stop、以下 SS）を行う。
- 途中の第 m 階層施設 ($1 \leq m \leq M$) は、 n_m 個が均等に配置されている。この施設は、第 $m-1$ 階層までに収集された需要を第 m 階層施設の中で最寄りの施設へ収集されるような第 m 階層輸送の目的地となり、集約した需要を第 $m+1$ 階層輸送に向けて出発する。
- 各階層での施設数は、 $n_0 \gg n_1 \gg \dots \gg n_m \gg \dots \gg n_M$ を満たすとする。階層数 m と施設数 n_m は本来自然数であるが、十分大きいと仮定して連続量近似して考える。

なお、配送の場合（one-to-many demand）も、これと全く逆の輸送過程となるので、同様の定式化となる。

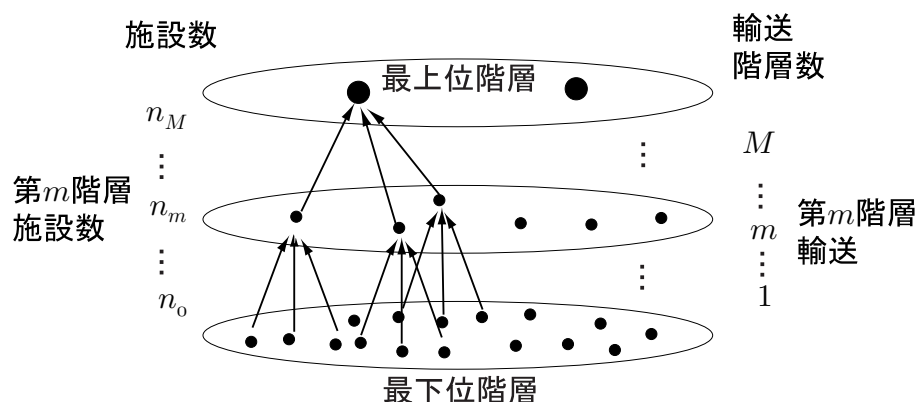


図 5.4: 多階層輸送モデル

規模の経済性を考慮した輸送費用

輸送費用を考えると、[小倉 (1999)] において「トラック運賃の仕組みは、原則的に長距離逓減と重量逓減の方式が採られている。」とある。つまり、輸送費用において、輸送量と輸送距離の増加に伴い、輸送費用の増加分、つまり限界費用は逓減していくと言える。以下、主に輸送量と輸送距離によって輸送費用が決定されるものとして考えると、輸送量 q の物を距離 l だけ運ぶときの輸送費用 C は、固定費用係数 K を考慮すると、

$$C = Kq^{\alpha}l^{\beta} \quad (0 \leq \alpha \leq 1, 0 < \beta \leq 1) \quad (5.2.1)$$

のような輸送量と輸送距離のべき関数になると仮定する。ここで、この式を両辺について対数変換を行うと、

$$\log C = \log K + \alpha \log q + \beta \log l$$

となり、変数 q, l について全微分を行うと、

$$\frac{dC}{C} = \alpha \frac{dq}{q} + \beta \frac{dl}{l}$$

となる。よって、 α は輸送量弾性値、 β は輸送距離弾性値と言える。

また、この式で求めた輸送費用を、輸送量 q 、輸送距離 l を変数として模式的に表現すると図 5.5 のような関係になり、輸送量と輸送距離の増加に伴う輸送費用の増加分の逓減が表現されている。

本研究では、輸送量・輸送距離が増加するとともにその費用増加分が逓減していくことを「規模の経済性」と呼ぶこととし、輸送費用における規模の経済性を表すパラメータとして、下記に α, β を定義する。

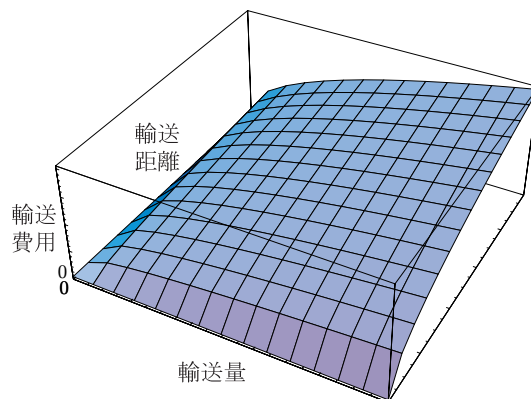


図 5.5: 輸送量・輸送距離と輸送費用の関係

第5章 輸送システムにおける最適な中継施設の階層構造

表 5.1: 各指標による最適階層数 M^*

	α	β
距離基準 (キロ)	0	1
重量基準 (トン)	1	0
距離重量基準 (トンキロ)	1	1

- α : 輸送費用の輸送量弾性値として, 輸送量に関する規模の経済性を表すパラメータ ($0 \leq \alpha \leq 1$) で, 規模の経済性が大きくなるほど α が小さくなる.
輸送品目の特性に依存し, まとめて運ぶ方が有利な品目ほど α は小さくなると考えられる.
- β : 輸送費用の輸送距離弾性値として, 輸送距離に関する規模の経済性を表すパラメータ ($0 < \beta \leq 1$) で, 規模の経済性が大きくなるほど β が小さくなる.
輸送品目の特性や長距離高速輸送技術の向上により, 距離を隔てて輸送することが容易になることによって, β は小さくなると考えられる.

従来の輸送システムの評価指標と比較すると, 表 5.1 のようになる. つまり, これらの指標を一般化した定式化が行えるといえる.

5.2.2 領域形状や集配経路による輸送費用

(i) 一次元線形都市

まず領域が一次元の場合を考える. 全長 L の線形都市において, 図 5.6 のような収集輸送をする状況を考える.

第 m 階層の n_m 個の施設に向かう輸送について見てみると, 図 5.7 のようになる. 第 m 階層一施設当たりの第 $m-1$ 階層施設数は $\frac{n_{m-1}}{n_m}$ であるが, $n_{m-1} \gg n_m$ を考慮し, 一施設の収集領域である長さ $\frac{L}{n_m}$ に亘って, 連続的に立地するものとする. 第 $m-1$ 階層の $\frac{n_{m-1}}{L}$ 個の施設から収集領域の中心に向かって, 輸送量 $q_m = \frac{n_0}{n_{m-1}}$ を輸送距離 l だけ輸送する.

規模の経済性 ($0 \leq \alpha \leq 1, 0 < \beta \leq 1$) を考慮すると, 第 m 階層での輸送費用は

$$\begin{aligned}
 c_m^l &= n_m 2 \int_0^{\frac{L}{2n_m}} \frac{n_{m-1}}{L} \left(\frac{n_0}{n_{m-1}} \right)^\alpha l^\beta dl \\
 &= \frac{n_0^\alpha}{\beta+1} \left(\frac{L}{2} \right)^\beta \frac{n_{m-1}^{1-\alpha}}{n_m^\beta}
 \end{aligned} \tag{5.2.2}$$

のようになる.

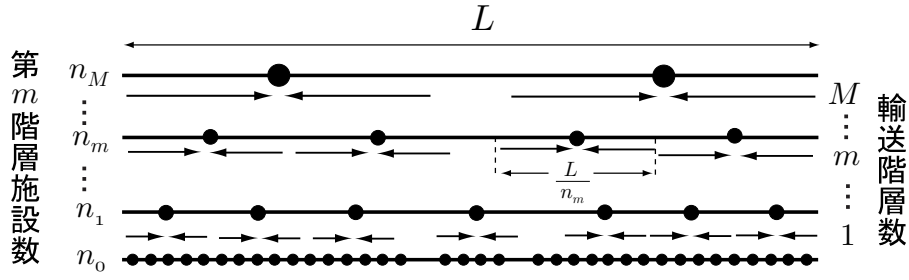
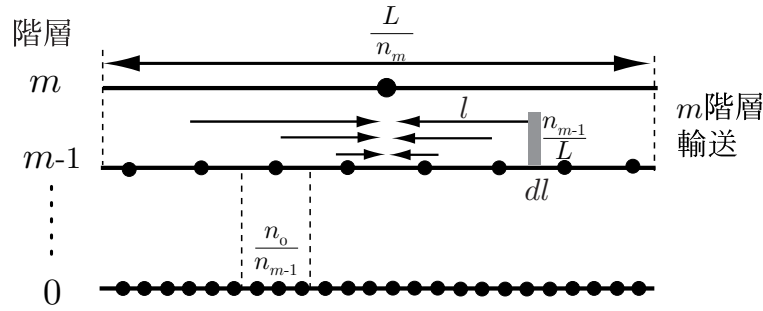


図 5.6: 一次元都市での収集輸送の概要

図 5.7: 一次元都市での第 m 階層での収集輸送の概要

(ii) 二次元正多角形都市

領域が二次元の場合で、図 5.8 のような各階層の収集領域は正 k 角形を考える．面積 S の正 k 角形都市において、第 m 階層の n_m 個の施設に向かって図 5.9 のような収集輸送をする状況を考える．

領域の境界までの一番近い距離は、第 m 階層の正 k 角形領域の中心から隣接領域の中心間の半分の長さとなるので、 $\sqrt{\frac{S}{n_m k \tan \frac{\pi}{k}}}$ である．(i) 一次元都市の場合と同様に、領域内で連続的に立地する $\frac{n_{m-1}}{S}$ 個の施設から第 m 階層の領域の中心に向かって、輸送量 $q_m = \frac{n_0}{n_{m-1}}$ を輸送距離 l だけ輸送する．

規模の経済性 ($0 \leq \alpha \leq 1, 0 < \beta \leq 1$) を考慮すると、第 m 階層での輸送費用は、

$$\begin{aligned}
 c_m^k &= n_m 2k \int_0^{\frac{\pi}{k}} \int_0^{\sqrt{\frac{S}{n_m k \tan \frac{\pi}{k}} \frac{1}{\cos \theta}}} \frac{n_{m-1}}{S} \left(\frac{n_0}{n_{m-1}} \right)^\alpha l^\beta l dl d\theta \\
 &= \frac{2n_0^\alpha k}{S(\beta+2)} \left(\frac{S}{k \tan \frac{\pi}{k}} \right)^{\frac{\beta}{2}+1} \int_0^{\frac{\pi}{k}} (\sec \theta)^{\beta+2} d\theta \frac{n_{m-1}^{1-\alpha}}{n_m^{\frac{\beta}{2}}} \quad (5.2.3)
 \end{aligned}$$

のようになる．

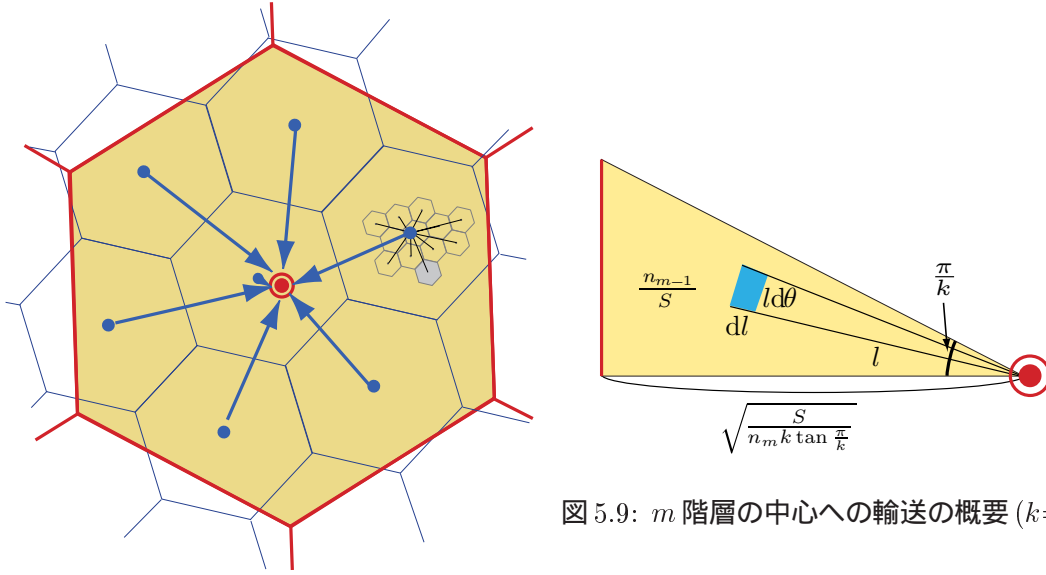


図 5.9: m 階層の中心への輸送の概要 ($k=6$)

図 5.8: 二次元都市での第 m 階層での収集輸送の概要 ($k=6$)

(iii) 二次元円形都市

面積 S の円形都市において, 第 m 階層の n_m 個の施設に向かって収集輸送をする状況を考える.

第 m 階層の輸送については, 図 5.10 のように行われているものとする. 第 m 階層の円領域の半径は $\sqrt{\frac{S}{\pi n_m}}$ であり, (ii) と同様に領域内で連続的に立地する $\frac{n_{m-1}}{S}$ 個の施設から円の中心に向かって, 輸送量 $q_m = \frac{n_0}{n_{m-1}}$ を輸送距離 l だけ輸送する.

規模の経済性 ($0 \leq \alpha \leq 1, 0 < \beta \leq 1$) を考慮すると, 第 m 階層での輸送費用は,

$$\begin{aligned} c_m^c &= n_m \int_0^{2\pi} \int_0^{\sqrt{\frac{S}{\pi n_m}}} \frac{n_{m-1}}{S} \left(\frac{n_0}{n_{m-1}} \right)^\alpha l^\beta l dl d\theta \\ &= \frac{2n_0^\alpha}{\beta+2} \left(\frac{S}{\pi} \right)^{\frac{\beta}{2}} \frac{n_{m-1}^{1-\alpha}}{n_m^{\frac{\beta}{2}}} \end{aligned} \quad (5.2.4)$$

のようになる.

(iv) 二次元正方形都市 (直交距離)

簡単のため, 各階層の収集領域は正方形とする. 面積 S の正方形都市において, 第 m 階層の n_m 個の施設に向かって収集輸送をする状況を考える.

第 m 階層輸送は, 図 5.11 のように行われているものとする. 第 m 階層の正方形領域の一边は $\frac{1}{2}\sqrt{\frac{S}{n_m}}$ であり, 領域内で連続的に立地する $\frac{n_{m-1}}{S}$ 個の施設から第 m 階層の領域の中心に

5.2. モデルの概要と輸送費用の定式化

向かって，輸送量 $q_m = \frac{n_0}{n_{m-1}}$ を輸送距離 l だけ輸送する．直交距離の性質から， $l = x + y$ となる．

規模の経済性 ($0 \leq \alpha \leq 1, 0 < \beta \leq 1$) を考慮すると，第 m 階層での輸送費用は，

$$\begin{aligned} c_m^r &= n_m 4 \int_0^{\frac{1}{2}\sqrt{\frac{S}{n_m}}} \int_0^{\frac{1}{2}\sqrt{\frac{S}{n_m}}} \frac{n_{m-1}}{S} \left(\frac{n_0}{n_{m-1}} \right)^\alpha (x+y)^\beta dx dy \\ &= \frac{2n_0^\alpha S^{\frac{\beta}{2}}}{(\beta+1)(\beta+2)} \left(2 - \frac{1}{2^\beta} \right) \frac{n_{m-1}^{1-\alpha}}{n_m^{\frac{\beta}{2}}} \end{aligned} \quad (5.2.5)$$

のようになる．

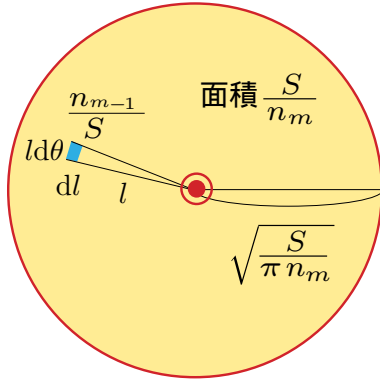


図 5.10: 第 m 階層の中心への輸送の概要
(円形都市)

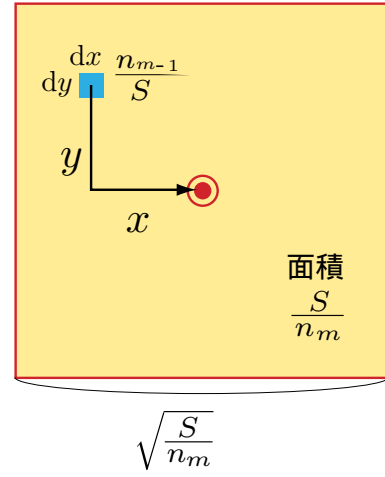


図 5.11: 第 m 階層の中心への輸送の概要
(直交距離)

5.2.3 総輸送費用の一般化

5.2.2 節では，各領域形状によって各階層での輸送費用を求めた．そして，(i) 一次元線形都市では式 (5.2.2)，(ii) 二次元正多角形都市では式 (5.2.3)，(iii) 二次元円形都市では式 (5.2.4)，(iv) 二次元正方形都市（直交距離）では式 (5.2.5) を導出した．ここで，階層数 m と関係ない項をひとまとめとして「輸送費用係数」と呼ぶこととして，これらをまとめて表現する式を考える．

表 5.2 のように，規模の経済性のパラメータ α, β と輸送費用係数を a, b, K へ置き換えることにより，輸送費用について領域形状によらずに一般化表記ができる．ここで， a, b の値域が α, β の定義域によって異なるので，(i) を「一次元 SS」，(ii)(iii)(iv) をまとめて「二次元 SS」と呼ぶこととする．

これにより，各階層の輸送費用は，

$$c_m = K \frac{n_{m-1}^a}{n_m^b} \quad (5.2.6)$$

表 5.2: パラメータの置換

	c_m	K	a	b	次元
(i)	c_m^l	$K_l = n_0^\alpha \frac{1}{\beta+1} \left(\frac{L}{2}\right)^\beta$	$1-\alpha$	β	一次元 SS
(ii)	c_m^k	$K_k = \frac{2n_0^\alpha k}{S(\beta+2)} \left(\frac{S}{k \tan \frac{\pi}{k}}\right)^{\frac{\beta}{2}+1} \int_0^{\frac{\pi}{k}} (\sec \theta)^{\beta+2} d\theta$		$\frac{\beta}{2}$	二次元 SS
(iii)	c_m^c	$K_c = \frac{2n_0^\alpha}{\beta+2} \left(\frac{S}{\pi}\right)^{\frac{\beta}{2}}$			
(iv)	c_m^r	$K_r = \frac{2n_0^\alpha S^{\frac{\beta}{2}}}{(\beta+1)(\beta+2)} \left(2 - \frac{1}{2^\beta}\right)$			

と一般化することができる．よって，求めるべき問題は一般化された総輸送費用 C_t を最小とすることなので，

$$\begin{aligned}
 \text{Minimize } C_t &= \sum_{m=1}^M c_m \\
 &= K \sum_{m=1}^M \frac{n_{m-1}^a}{n_m^b}
 \end{aligned} \tag{5.2.7}$$

と表現することができる．このとき， a と b の関係による下記の場合分けにより，需要量 n_0 ，最上階層施設数 n_M が所与である時に，最適となる階層的輸送システムとして階層数 M^* と第 m 階層施設数 n_m^* を導出する．

1. $a = 0$: 輸送量における規模の経済性が存在しない場合 (5.3.1 節)
2. $a = b$: 規模の経済性について一定の関係がある場合 (5.3.2 節)
3. $a \neq b$: 規模の経済性について一般的な関係がある場合 (5.3.3 節)

5.3 輸送費用最小化による最適な階層構造の導出

前節で定式化した総輸送費用の式 (5.2.7) を, a と b の値による 3 つの場合分けにより最小化することにより, 最適輸送システムの導出する. 費用を最小とする各階層での上下階層との施設数の関係を求めることによって, その条件のもとでの最適な階層数を求める.

5.3.1 輸送量における規模の経済性が存在しない場合

総輸送費用 C_t の式 (5.2.7) に, $a = 0$ を代入すると,

$$C_t = K \sum_{m=1}^M \frac{1}{n_m^b} \quad (5.3.1)$$

となる. この式が施設数 n_m について一階の条件をとると,

$$\frac{\partial C_t}{\partial n_m} = -\frac{1}{n_m^2}$$

となり, $n_m > 0$ の条件では最小値をとらない. しかし, 本研究では必ず最上階層施設へ輸送しなければならないので, 最適な輸送システムは途中で収集輸送を行わない直行輸送 ($M^* = 1$) となる.

5.3.2 規模の経済性について一定の関係がある場合

$a = b$ の場合について, 総輸送費用 C_t の式 (5.2.7) に $a = b$ を代入し, a のみで表現すると,

$$C_t = K \sum_{m=1}^M \left(\frac{n_{m-1}}{n_m} \right)^a \quad (5.3.2)$$

となる. 総輸送費用 C_t を施設数 n_m に関して一階の条件をとると,

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_t}{\partial n_m} &= \frac{-K a n_{m-1}^a}{n_m^{a+1}} + \frac{a n_m^{a-1}}{n_{m+1}^a} \\ &= 0 \end{aligned}$$

となり, これを整理すると,

$$\frac{n_m}{n_{m+1}} = \frac{n_{m-1}}{n_m}, \quad m = 1, 2, \dots, M-1 \quad (5.3.3)$$

が得られる. これは, 1 つ上の階層の施設数との比率が一定であるような関係を示した 3 項間の漸化式となっている. また, 総輸送費用 C_t を施設数 n_m に関して二階の条件を取ると, $0 < a \leq 1$ であるので,

$$\frac{\partial^2 C_t}{\partial n_m^2} = \frac{K a (a+1) n_{m-1}^a}{n_m^{a+2}} + \frac{K a (a-1) n_m^{a-2}}{n_{m+1}^a} > 0$$

第5章 輸送システムにおける最適な中継施設の階層構造

となることから，総輸送費用 C_t は下に凸な関数である．よって，総輸送費用 C_t が最小値をもつことが分かる．

3 項間の漸化式である式 (5.3.3) の関係を用いると，

$$\begin{aligned}\frac{n_0}{n_m} &= \frac{n_{m-1}}{n_m} \frac{n_{m-2}}{n_{m-1}} \cdots \frac{n_0}{n_1} \\ &= \left(\frac{n_0}{n_1} \right)^m\end{aligned}$$

となる．ここで， $m = M$ を代入すると，

$$\frac{n_0}{n_M} = \left(\frac{n_0}{n_1} \right)^M$$

となり，未知である n_1 を所与である n_0, n_M を用いて表した．この関係を用いることにより，第 m 階層施設数 n_m^\dagger は，

$$\begin{aligned}n_m^\dagger &= n_0 \left(\frac{n_1}{n_0} \right)^m \\ &= n_0 \left(\frac{n_M}{n_0} \right)^{\frac{m}{M}}\end{aligned}\tag{5.3.4}$$

となる．この式と一つ下の階層施設数との比をとると，

$$\frac{n_{m-1}^\dagger}{n_m^\dagger} = \left(\frac{n_0}{n_M} \right)^{\frac{1}{M}}$$

となり，これを総輸送費用の式 (5.3.2) に代入すると，施設数の式 (5.3.4) が成り立つときの総輸送費用 C_t^\dagger は，以下のように求まる．

$$\begin{aligned}C_t^\dagger &= K \sum_{m=1}^M \left(\frac{n_0}{n_M} \right)^{\frac{a}{M}} \\ &= KM \left(\frac{n_0}{n_M} \right)^{\frac{a}{M}}\end{aligned}\tag{5.3.5}$$

これまでに，上下階層間の施設数が最適となる条件の下での総輸送費用が求まった．これから，この施設関係を持つ階層構造において，総輸送費用を最小とする階層数を算出する．

総輸送費用の式 (5.3.5) について階層数 M に関する一階の条件をとると，

$$\begin{aligned}\frac{\partial C_t^\dagger}{\partial M} &= K \left(\frac{n_0}{n_M} \right)^{\frac{a}{M}} - \frac{aK}{M} \left(\frac{n_0}{n_M} \right)^{\frac{a}{M}} \log \frac{n_0}{n_M} \\ &= K \left(\frac{n_0}{n_M} \right)^{\frac{a}{M}} \left(1 - \frac{a}{M} \log \frac{n_0}{n_M} \right) \\ &= 0\end{aligned}$$

となり整理すると，最適な階層数 M^* は，

$$M^* = a \log \frac{n_0}{n_M}\tag{5.3.6}$$

5.3. 輸送費用最小化による最適な階層構造の導出

と求まり，パラメータ a と 1 つの最上階層施設当たりの最下階層施設数（需要数）の対数に比例するという非常に明快な結果を得た．また，階層数 M に関する二階の条件より，

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 C_t^\dagger}{\partial M^2} &= -\frac{aK}{M^2} \left(\frac{n_0}{n_M}\right)^{\frac{a}{M}} \log \frac{n_0}{n_M} + \frac{aK}{M^2} \left(\frac{n_0}{n_M}\right)^{\frac{a}{M}} \log \frac{n_0}{n_M} \\ &\quad + \frac{aK}{M^2} \left(\frac{n_0}{n_M}\right)^{\frac{a}{M}} \log \frac{n_0}{n_M} \frac{aK}{M} \log \frac{n_0}{n_M} \\ &= \frac{2a^2 K}{M^3} \left(\frac{n_0}{n_M}\right)^{\frac{a}{M}} \log \frac{n_0}{n_M} \\ &> 0\end{aligned}$$

となるので，総輸送費用 C_t は下に凸な関数であることが分かる．よって，階層数の式 (5.3.6) が最小値となるので，最適な輸送階層数であることが確認された．

そして，式 (5.3.4) から最適な第 m 階層施設数 n_m^* は，

$$\begin{aligned}n_m^* &= n_0 \left(\frac{n_M}{n_0}\right)^{\frac{m}{a \log \frac{n_0}{n_M}}} \\ &= n_0 \left(\frac{n_M}{n_0}\right)^{-\frac{m}{a \log \frac{n_M}{n_0}}} \\ &= n_0 e^{-\frac{m}{a}}\end{aligned}\tag{5.3.7}$$

となる．最適な階層輸送システムでの総輸送費用 C^* は，総輸送費用の式 (5.3.5) より，

$$\begin{aligned}C_t^* &= K a \log \frac{n_0}{n_M} \left(\frac{n_0}{n_M}\right)^{\frac{a}{a \log \frac{n_0}{n_M}}} \\ &= K a e \log \frac{n_0}{n_M}\end{aligned}\tag{5.3.8}$$

と求めることができる．

このときの第 m 階層輸送での輸送費用 c_m^* は，式 (5.2.6) より，

$$\begin{aligned}c_m^* &= K \left(\frac{n_{m-1}}{n_m}\right)^a \\ &= K \left(\frac{n_0 e^{-\frac{m-1}{a}}}{n_0 e^{-\frac{m}{a}}}\right)^a \\ &= K e\end{aligned}\tag{5.3.9}$$

となり，階層によらず一定の費用となることが分かる．

図 5.12 では， $a = b = 0.5$ ($K = 2, n_0 = 1000, n_M = 1$) の場合，総輸送費用 C_t^\dagger をプロットしたものであり，輸送費用が階層数 3 近くで最小となることが分かる．階層数が多すぎると遠回りが多くなるため，また階層数が少なすぎるとまとめて運ぶメリットが生かされないため，それぞれ輸送費用が高くなると考えられる．式 (5.3.6) より，最適となる階層数 $M^* = 3.45$ とほぼ一致する．

第5章 輸送システムにおける最適な中継施設の階層構造

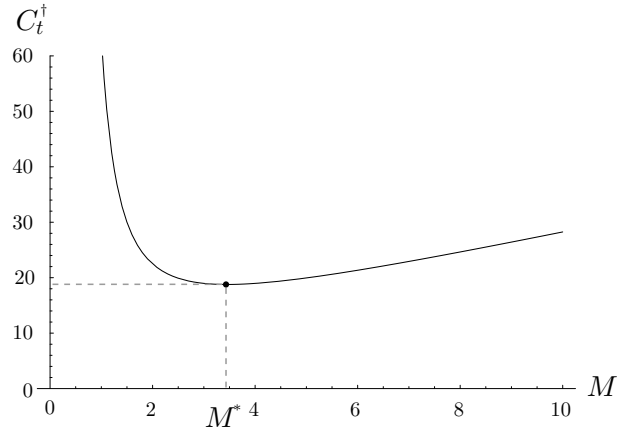


図 5.12: 階層数 M と総輸送費用 C_t^{\dagger} の関係 ($a = b$)

5.3.3 規模の経済性について一般的な関係の場合

$a \neq b$ の場合において総輸送費用の式 (5.2.7) について，施設数 n_m に関する一階の条件をとると，

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_t}{\partial n_m} &= \frac{-Kbn_{m-1}^a}{n_m^{b+1}} + \frac{Kan_m^{a-1}}{n_{m+1}^b} \\ &= 0 \end{aligned}$$

となり，これを整理すると，

$$\frac{n_m}{n_{m+1}} = \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1}{b}} \left(\frac{n_{m-1}}{n_m}\right)^{\frac{a}{b}} \quad m = 1, 2, \dots, M-1 \quad (5.3.10)$$

が得られる．これは，1 つ上の階層の施設数との比率についての 3 項間漸化式となっている．また，総輸送費用 C_t について施設数 n_m に関して二階の条件をとると， $0 < a \leq 1, 0 < b \leq 1$ であるので，

$$\frac{\partial^2 C_t}{\partial n_m^2} = \frac{Kb(b+1)n_{m-1}^a}{n_m^{b+2}} + \frac{Ka(a-1)n_m^{a-2}}{n_{m+1}^b} > 0$$

となるので，総輸送費用 C_t は下に凸な関数である．よって，総輸送費用 C_t は最小値を持つことが分かる．

3 項間漸化式である式 (5.3.10) の関係から ,

$$\begin{aligned}
 \frac{n_0}{n_m} &= \frac{n_{m-1}}{n_m} \frac{n_{m-2}}{n_{m-1}} \cdots \frac{n_0}{n_1} \\
 &= \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1-(a/b)}{b-a}} \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^{a/b} \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1-(a/b)^2}{b-a}} \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^{(a/b)^2} \cdots \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1-(a/b)^m}{b-a}} \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^{(a/b)^m} \\
 &= \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1-(a/b)}{b-a} + \frac{1-(a/b)^2}{b-a} + \cdots + \frac{1-(a/b)^m}{b-a}} \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^{a/b + (a/b)^2 + \cdots + (a/b)^m} \\
 &= \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1}{b-a} \left\{ m - \frac{1-(a/b)^m}{1-(a/b)} \right\}} \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^{\frac{1-(a/b)^{m+1}}{1-(a/b)}}
 \end{aligned}$$

となる . これに階層数 $m = M$ を代入すると ,

$$\frac{n_0}{n_M} = \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1}{b-a} \left\{ M - \frac{1-(a/b)^M}{1-(a/b)} \right\}} \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^{\frac{1-(a/b)^{M+1}}{1-(a/b)}}$$

となり , 未知である施設数 n_1 を所与である n_0, n_M を用いて表すことができる . この関係を用いることによって , 第 m 階層施設数 n_m^\dagger は ,

$$\begin{aligned}
 n_m^\dagger &= n_0 \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1}{a-b} \left\{ m - \frac{1-(a/b)^m}{1-(a/b)} \right\}} \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^{-\frac{1-(a/b)^{m+1}}{1-(a/b)}} \\
 &= n_0 \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1}{a-b} \left\{ m - \frac{1-(a/b)^m}{1-(a/b)} \right\}} \left[\frac{n_0}{n_M} \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1}{a-b} \left\{ M - \frac{1-(a/b)^M}{1-(a/b)} \right\}} \right]^{-\frac{1-(a/b)^m}{1-(a/b)}} \\
 &= n_0 \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1}{a-b} \left\{ m - \frac{1-(a/b)^m}{1-(a/b)} - \frac{1-(a/b)^m}{1-(a/b)^M} M + \frac{1-(a/b)^m}{1-(a/b)} \right\}} \left(\frac{n_M}{n_0}\right)^{\frac{1-(a/b)^m}{1-(a/b)^M}} \\
 &= n_0 \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1}{a-b} \left\{ m - \frac{1-(a/b)^m}{1-(a/b)^M} M \right\}} \left(\frac{n_M}{n_0}\right)^{\frac{1-(a/b)^m}{1-(a/b)^M}} \tag{5.3.11}
 \end{aligned}$$

となる . この関係から ,

$$\begin{aligned}
 \frac{n_{m-1}^\dagger}{n_m^\dagger} &= \left[n_0 \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1}{a-b} \left\{ (m-1) - \frac{1-(a/b)^{m-1}}{1-(a/b)} M \right\}} \left(\frac{n_M}{n_0}\right)^{\frac{1-(a/b)^{m-1}}{1-(a/b)^M}} \right]^a \\
 &\quad \left[n_0 \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1}{a-b} \left\{ m - \frac{1-(a/b)^m}{1-(a/b)^M} M \right\}} \left(\frac{n_M}{n_0}\right)^{\frac{1-(a/b)^m}{1-(a/b)^M}} \right]^{-b} \\
 &= (n_0)^{a-b} \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1}{a-b} \left\{ a(m-1) - \frac{a-b(a/b)^m}{1-(a/b)^M} M - bm + \frac{b-b(a/b)^m}{1-(a/b)^M} M \right\}} \\
 &\quad \left(\frac{n_M}{n_0}\right)^{\frac{a-b(a/b)^m - b + b(a/b)^m}{1-(a/b)^M}} \\
 &= (n_0)^{a-b} \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{a}{a-b} + \frac{M}{1-(a/b)^M}} \left(\frac{n_0}{n_M}\right)^{\frac{b-a}{1-(a/b)^M}} \left(\frac{b}{a}\right)^m
 \end{aligned}$$

第5章 輸送システムにおける最適な中継施設の階層構造

が求まる．よって，これを総輸送費用の式 (5.2.7) に代入すると，施設数の式 (5.3.11) が成り立つときの総輸送費用 C_t^\dagger が以下のように求まる．

$$\begin{aligned} C_t^\dagger &= \sum_{m=1}^M K(n_0)^{a-b} \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{a}{a-b} + \frac{M}{1-(a/b)^M}} \left(\frac{n_0}{n_M}\right)^{\frac{b-a}{1-(a/b)^M}} \left(\frac{b}{a}\right)^m \\ &= K(n_0)^{a-b} \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{b}{a-b} + \frac{M}{1-(a/b)^M}} \frac{a}{a-b} \left\{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^M\right\} \left(\frac{n_0}{n_M}\right)^{\frac{b-a}{1-(a/b)^M}} \quad (5.3.12) \end{aligned}$$

これまでに，上下階層間の施設数が最適となる条件の下での総輸送費用が求まった．これから，この施設関係を持つ階層構造において，総輸送費用を最小とする階層数を算出する．

総輸送費用の式 (5.3.5) について，階層数 M に関する一階の条件をとると，

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_t^\dagger}{\partial M} &= K(n_0)^{a-b} \frac{b}{a-b} \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{a}{a-b}} \left[\left\{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^M\right\} \left(\frac{n_0}{n_M}\right)^{\frac{b-a}{1-(a/b)^M}} \right. \\ &\quad \left. \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{M}{1-(a/b)^M}} \log \frac{a}{b} \left(\frac{1}{1-(a/b)^M} + \frac{(a/b)^M M \log a/b}{(1-(a/b)^M)^2} \right) \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{b}{a}\right)^M \log \frac{a}{b} \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{M}{1-(a/b)^M}} \left(\frac{n_0}{n_M}\right)^{\frac{b-a}{1-(a/b)^M}} \right. \\ &\quad \left. + \frac{(a/b)^M (b-a)}{(1-(a/b)^M)^2} \log \frac{a}{b} \log \frac{n_0}{n_M} \left(\frac{n_0}{n_M}\right)^{\frac{b-a}{1-(a/b)^M}} \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{M}{1-(a/b)^M}} \left\{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^M\right\} \right] \\ &= K(n_0)^{a-b} \frac{b}{a-b} \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{a}{a-b} + \frac{M}{1-(a/b)^M}} \left(\frac{n_0}{n_M}\right)^{\frac{b-a}{1-(a/b)^M}} \frac{1}{(a/b)^M - 1} \log \frac{a}{b} \\ &\quad \left\{ M \log \frac{a}{b} + (b-a) \log \frac{n_0}{n_M} \right\} \\ &= 0 \end{aligned}$$

となり整理すると，最適な階層数 M^* は，

$$M^* = \frac{a-b}{\log \frac{a}{b}} \log \frac{n_0}{n_M} \quad (5.3.13)$$

と求まり，パラメータ a, b と1つの最上階層施設当たりの最下階層施設（需要数）の対数に比例するという非常に明快な結果を得た．そして，総輸送費用 C_t について階層数 M に関する二階の条件から，

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 C_t^\dagger}{\partial M^2} &= K(n_0)^{a-b} \frac{a}{a-b} \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{a}{a-b} + \frac{M}{1-(a/b)^M}} \frac{\log a/b}{(a/b)^M - 1} \left[\frac{M \log \frac{a}{b} + (b-a) \log \frac{n_0}{n_M}}{1-(a/b)^M} \right. \\ &\quad \left. \times \left\{ 1 + \left(\frac{a}{b}\right)^M + \frac{(a/b)^M}{1-(a/b)^M} \left(M \log \frac{a}{b} + (b-a) \log \frac{n_0}{n_M} \right) \right\} + 1 \right] \\ &> 0 \end{aligned}$$

と得られ， C_t は下に凸な関数である．よって，最適階層数の式 (5.3.13) が最小値であることが分かる．

5.3. 輸送費用最小化による最適な階層構造の導出

ここで、最適階層数の式 (5.3.13) で、 a と b が限りなく近い場合について求める。しかし、 $\lim_{a \rightarrow b} M^*$ は不定形であるので、

$$\begin{aligned} f(a) &= a - b \\ g(a) &= \log a - \log b \end{aligned}$$

とすると、ともに $\lim_{a \rightarrow b} f(a) = 0, \lim_{a \rightarrow b} g(a) = 0$ になるので、ロピタルの定理より、

$$\begin{aligned} \lim_{a \rightarrow b} M^* &= \lim_{a \rightarrow b} \frac{f(a)}{g(a)} \log \frac{n_0}{n_M} \\ &= \lim_{a \rightarrow b} \frac{f'(a)}{g'(a)} \log \frac{n_0}{n_M} \\ &= \lim_{a \rightarrow b} \frac{1}{1/a} \log \frac{n_0}{n_M} \\ &= a \log \frac{n_0}{n_M} \end{aligned}$$

よって、 a を b に限りなく近づけた場合、5.3.2 節で $a = b$ の条件で得られた最適階層数の式 (5.3.6) と一致する結果を得た。つまり、この 2 つの式は連続的に変化する関数であり、本節の結果を用いれば一般的な結果として通用することが確認することができた。

そして、最適階層数の式 (5.3.13) を変形すると、

$$\left(\frac{a}{b}\right)^M = \left(\frac{n_0}{n_M}\right)^{a-b}$$

となることから、最適な第 m 階層施設数 n_m^* は、

$$\begin{aligned} n_m^* &= n_0 \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{m}{a-b}} \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{M}{a-b} \frac{1-(a/b)^m}{1-(a/b)^M}} \left(\frac{n_M}{n_0}\right)^{\frac{1-(a/b)^m}{1-(a/b)^M}} \\ &= n_0 \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{m}{a-b}} \left(\frac{n_0}{n_M}\right)^{\frac{1-(a/b)^m}{1-(a/b)^M}} \left(\frac{n_M}{n_0}\right)^{\frac{1-(a/b)^m}{1-(a/b)^M}} \\ &= n_0 \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{m}{b-a}} \end{aligned} \quad (5.3.14)$$

となる。よって、総輸送費用の式 (5.3.12) に代入することにより、最適な階層数での総輸送費用 C^* は

$$\begin{aligned} C_t^* &= K(n_0)^{a-b} \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{a}{a-b}} \frac{a}{a-b} \left\{ 1 - \left(\frac{b}{a}\right)^M \right\} \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{M}{1-(a/b)^M}} \left(\frac{n_0}{n_M}\right)^{\frac{b-a}{1-(a/b)^M}} \\ &= K(n_0)^{a-b} \frac{b}{b-a} \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{a}{a-b}} \left\{ \left(\frac{n_0}{n_M}\right)^{b-a} - 1 \right\} \end{aligned} \quad (5.3.15)$$

と求まる。

第5章 輸送システムにおける最適な中継施設の階層構造

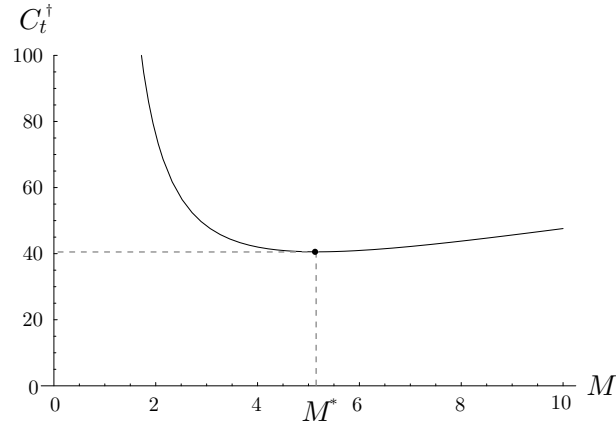


図 5.13: 階層数 M による総輸送費用 C_t^\dagger

このときの第 m 階層輸送での輸送費用 c_m^* は、式 (5.2.6) より、

$$\begin{aligned}
 c_m^* &= K \frac{n_{m-1}^a}{n_m^b} \\
 &= K \left\{ n_0 \left(\frac{a}{b} \right)^{\frac{m-1}{b-a}} \right\}^a \left\{ n_0 \left(\frac{a}{b} \right)^{\frac{m}{b-a}} \right\}^{-b} \\
 &= K n_0^{a-b} \left(\frac{a}{b} \right)^{\frac{a(m-1)-bm}{b-a}} \\
 &= K n_0^{a-b} \left(\frac{a}{b} \right)^{\frac{a}{a-b} - m}
 \end{aligned} \tag{5.3.16}$$

となる。

図 5.13 は、 $a = 0.7, b = 0.8 (K = 2, n_0 = 1000, n_M = 1)$ の場合について C^\dagger をプロットしたものである。図より輸送費用が階層数 5 で最小となり、階層数が少なすぎる場合には費用が非常に大きくなることが分かる。また、最適となる階層数は式 (5.3.13) による $M^* = 5.173$ とほぼ一致する。

5.3.4 最適な階層数・施設数と対数分岐比の算出

5.3.2 節（一定の関係の場合）と 5.3.3 節（一般の場合）のそれぞれにおいて最適な階層構造 M^*, n_m^* を求めた。本節では、その結果を領域次元毎に規模の経済性 α, β になおして表現する。

一次元 SS

定義域 $0 \leq \alpha < 1, 0 < \beta \leq 1$ において,

$$M^* = \begin{cases} \beta \log \frac{n_0}{n_M} & \text{if } \alpha + \beta = 1, \\ \frac{1 - \alpha - \beta}{\log \frac{1-\alpha}{\beta}} \log \frac{n_0}{n_M} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.3.17)$$

$$n_m^* = \begin{cases} n_0 e^{-\frac{m}{\beta}} & \text{if } \alpha + \beta = 1, \\ n_0 \left(\frac{1 - \alpha}{\beta} \right)^{\frac{m}{\alpha + \beta - 1}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.3.18)$$

となる．ここで，最適な第 m 階層施設数 n_m^* である式 (5.3.18) について両辺を対数変換すると，

$$\log n_m^* = \begin{cases} \log n_0 - \frac{1}{\beta} m & \text{if } \alpha + \beta = 1, \\ \log n_0 - \frac{m}{1 - \alpha - \beta} \log \frac{1 - \alpha}{\beta} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.3.19)$$

となり，階層数 m に関する一次減少関数となる．

二次元 SS

定義域は $0 \leq \alpha < 1, 0 < \beta \leq 1$ であるが， $a = b$ すなわち $\alpha + \beta/2 = 1$ の場合は α, β の定義域より $\frac{1}{2} \leq \alpha < 1, 0 < \beta \leq 1$ となる．このとき，

$$M^* = \begin{cases} \frac{\beta}{2} \log \frac{n_0}{n_M} & \text{if } \alpha + \frac{\beta}{2} = 1, \\ \frac{1 - \alpha - \beta/2}{\log \frac{1-\alpha}{\beta/2}} \log \frac{n_0}{n_M} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.3.20)$$

$$n_m^* = \begin{cases} n_0 e^{-\frac{2m}{\beta}} & \text{if } \alpha + \frac{\beta}{2} = 1, \\ n_0 \left(\frac{1 - \alpha}{\beta/2} \right)^{\frac{m}{\alpha + \beta/2 - 1}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.3.21)$$

となる．そして，最適となる第 m 階層施設数 n_m^* である式 (5.3.21) について両辺を対数変換すると，

$$\log n_m^* = \begin{cases} \log n_0 - \frac{2}{\beta} m & \text{if } \alpha + \frac{\beta}{2} = 1, \\ \log n_0 - \frac{m}{1 - \alpha - \beta/2} \log \frac{1 - \alpha}{\beta/2} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.3.22)$$

となり，ともに階層数 m に関する一次減少関数となる．

 対数分岐比 r の定義

一次元 SS の式 (5.3.19)，二次元 SS の式 (5.3.22) より， m が増加すると，その係数の割合で施設数が単調減少していくことが分かる．ここで， m にかかる係数を新たに r として定義する

第5章 輸送システムにおける最適な中継施設の階層構造

ことによって、階層数が増加するほど、施設数がどのような割合で変化していくのかを計測することが可能となる。

表 5.3 のように、この 2 式から求められた r を置くことによって、一次元 SS、二次元 SS とともに最適階層数及び第 m 階層施設数を、

$$M^* = \frac{1}{r} \log \frac{n_0}{n_M} \quad (5.3.23)$$

$$\log n_m^* = \log n_0 - rm \quad (5.3.24)$$

と書くことができる。

表 5.3: 領域次元による対数分岐比 r

	一定の関係の場合 (5.3.2 節)	一般の場合 (5.3.3 節)
一次元 SS	$\frac{1}{\beta} \left(= \frac{1}{1-\alpha} \right)$	$\frac{1}{1-\alpha-\beta} \log \frac{1-\alpha}{\beta}$
二次元 SS	$\frac{2}{\beta} \left(= \frac{1}{1-\alpha} \right)$	$\frac{1}{1-\alpha-\beta/2} \log \frac{1-\alpha}{\beta/2}$

そして、施設数の式 (5.3.24) を変形すると、

$$\begin{aligned} \log n_m^* - \log n_{m-1}^* &= \log n_0 - rm - \{\log n_0 - r(m-1)\} \\ &= -r \end{aligned}$$

となり、これを r について整理すると、

$$r = \log \frac{n_{m-1}^*}{n_m^*} \quad (5.3.25)$$

と求まる。

このように r は一階層下施設数との施設数の比の対数であることが分かる。よって、これから r を「対数分岐比」と呼ぶこととする。ちなみに、河川の形態則で階層による流水路数の式 (1.2.1) における分岐比 r_b と、ほぼ同様な形式である。

本節で求めた最適な輸送システムにおいては、 r は階層数によらず一定となる。つまり、対数軸に対して直線関係を保っていることが分かる。

一方、一般的な輸送システムにおいては、 r は施設数のデータのみで表現することができるため、比較的簡便に求まる。もし r が階層間によって異なるなら、その施設数の関係は対数軸に対して直線関係ではなく、その輸送階層での r の大小によって他の階層や最適な輸送システムの場合と比べて集約の度合いがどの程度であるのかを数値として算出して比較することができる。

5.4 輸送システムにおける最適な階層構造の特性

前節で導出した最適な階層的輸送システムにおける階層数 M^* と第 m 階層施設数 n_m^* を用いて、最上階層施設数 n_M が所与である場合に、規模の経済性を表す輸送量弾性値 α ，輸送距離弾性値 β ，需要量 n_0 のパラメータの変化により、階層構造がどのように変化するのか考察する。

なお本節での数値計算例は、需要量 $n_0 = 1000$ (5.4.3 節を除く)、最上階層施設数 $n_M = 1$ としているが、一般性は失われない。

5.4.1 規模の経済性による最適な階層数

まず、一次元 SS についての式 (5.3.17) から規模の経済性 $\alpha, \beta (0 \leq \alpha < 1, 0 < \beta \leq 1)$ による最適な輸送階層数 M^* を、連続的に階層数が変化するようにプロットすると、図 5.14 のようになる。輸送量弾性値 α が小さくなるほど最適階層数 M^* が大きくなり、輸送距離弾性値 β が小さくなるほど最適階層数 M^* が小さくなることが分かる。また、前節では定式化できず、式の定義域外にある $\alpha = 1, \beta = 0$ に近づくほど、階層数はほぼ 0 へ漸近するため、階層的輸送を行わず直行輸送を行う方がよいと言える。

現実の輸送における階層数を考える場合には、最適階層数 M^* に最も近い整数値が階層数になると考えられる。そこで、階層数の整数値についての等高線をプロットすると図 5.15 のようになる。これは、図 5.14 の結果を階段状にしたものである。等高線は、 $(\alpha, \beta) = (0, 1)$ から $(\alpha, \beta) = (1, 0)$ へと結ぶ対角線に対して、ほぼ対称になっていることが分かる。これは、 α, β それぞれの一単位の増減は、同じ重さで階層構造に影響を与えていると言える。

次に、二次元 SS についての輸送階層数を式 (5.3.20) から、連続的に階層数が変化するようにプロットすると図 5.16 のようになる。輸送量弾性値 α が小さくなるほど M^* が大きくなり、輸送距離弾性値 β が小さくなるほど M^* が小さくなるように、一次元都市と同じ傾向が見られる。

図 5.17 は、階層数の整数値についての等高線をプロットしたものである。すると、階層数が一次元の場合よりも少ないために等高線が粗になっており、また最適階層数 $M^* = 1$ 以下となるために、積み替えをしない方が良い領域が大きくなっている。また、一次元 SS の結果とは異なり、 α と β の各方向の等高線間隔が異なるので、 α, β それぞれの一単位の増減が階層構造に与える影響は同じ大きさでないとと言える。これは、式 (5.3.20) において、輸送距離弾性値 β に $1/2$ がかかっているため、 β の変化がより鈍く反映されるからである。

一次元 SS，二次元 SS の結果はともに、規模の経済性 α, β の変化に対して、連続的に階層数が変化している。つまり、5.3.2 節と 5.3.3 節とで求めた結果は、特殊な場合ではなく連続するものであることが分かる。

第5章 輸送システムにおける最適な中継施設の階層構造

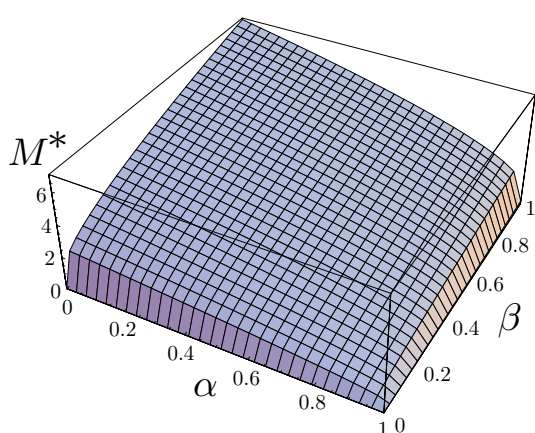


図 5.14: 規模の経済性 α, β による最適階層数 M^* (一次元 SS)

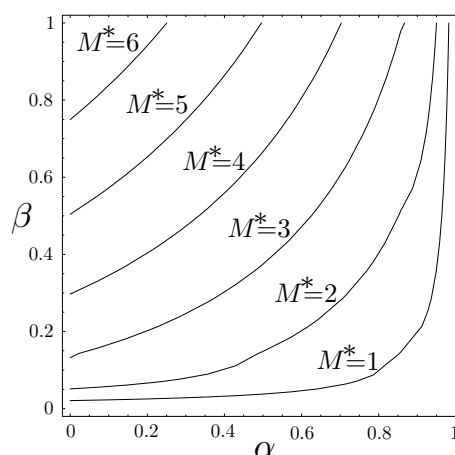


図 5.15: 規模の経済性 α, β による最適階層数 M^* の等高線 (一次元 SS)

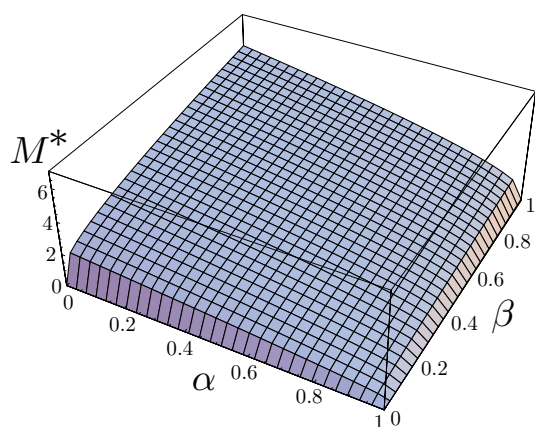


図 5.16: 規模の経済性 α, β による最適階層数 M^* (二次元 SS)

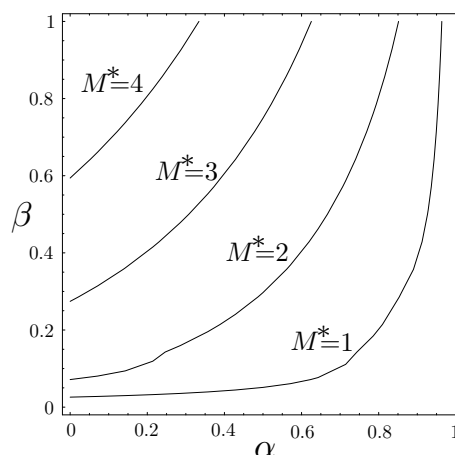


図 5.17: 規模の経済性 α, β による最適階層数 M^* の等高線 (二次元 SS)

つまり，輸送量弾性値 α が小さくなり輸送量に関する規模の経済性が大きくなる程，最適な輸送階層数は増加しこまめに積み替えた方が良いことを示している．また，輸送距離弾性値 β が小さくなり輸送距離に関する規模の経済性が大きくなるほど程，最適な輸送階層数は減少しなるべく積み替えをしない方が良いことを示している．

領域次元による比較

一次元都市と二次元都市の場合との比較によって，空間の広がりの違いによる影響を考える．図 5.18 において，上では左図では輸送量弾性値 $\alpha = 0$ の断面，右図では輸送距離弾性値 $\beta = 1$ の断面を見たものである．同図の下は，左図では輸送量弾性値 $\alpha = 0.7$ の断面と右図では輸送

5.4. 輸送システムにおける最適な階層構造の特性

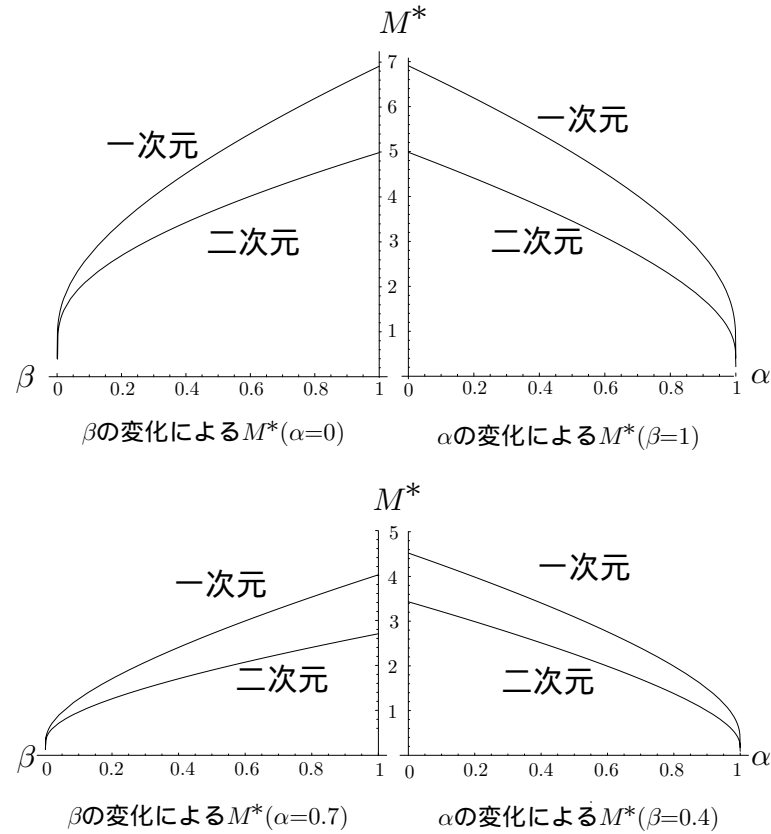


図 5.18: 次元による最適階層数 M^*

距離弾性値 $\beta = 0.4$ の断面を見たものである．左図で輸送量弾性値 α を固定して輸送距離弾性値 β を変化させたり，右図で輸送距離弾性値 β を固定して輸送量弾性値 α を変化させても，一次元 SS の方が二次元 SS より最適な階層数は必ず多くなっている．

これは，同じ α, β であっても，前節の階層数の式 (5.3.23) より，一次元 SS の方が二次元 SS よりも対数分岐比 r が小さくなるために，階層数が多くなる．この違いは輸送距離弾性値 β にかかる係数によるものだけなので，面的広がりをもつ場合の方が，遠距離の需要ほど多くなり，輸送距離に対する規模の経済性がより働くためであると考えられる．

つまり，一次元 SS が極端に細長い二次元 SS であると考えると，領域形状が細長くなるほど多階層構造の輸送システムが必要であると言える．

5.4.2 規模の経済性による最適な第 m 階層施設数

第 m 階層施設数について，階層数と規模の経済性の変化による施設数の変化について考察する．この場合， $n_m^* = n_M$ のときに階層数 $m = M^*$ と一致し，実際の輸送における施設数は n_m^* に最も近い整数値となると考えられる．

第5章 輸送システムにおける最適な中継施設の階層構造

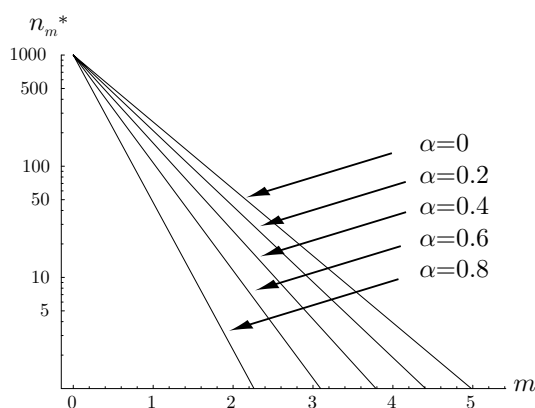


図 5.19: 輸送量弾性値 α による最適施設数 $n_m^*(\beta=1)$

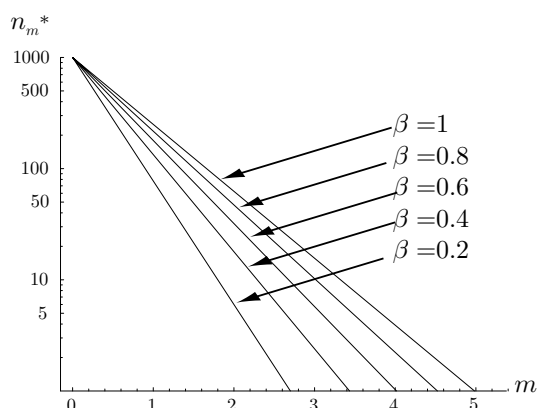


図 5.20: 輸送距離弾性値 β による最適施設数 $n_m^*(\alpha=0)$

表 5.4: 輸送量弾性値 α による対数分岐比 r と最適階層数 $M^*(\beta=1)$

α	r	M^*
0	1.38	4.98
0.2	1.56	4.41
0.4	1.82	3.79
0.6	2.23	3.09
0.8	3.05	2.26

表 5.5: 輸送距離弾性値 β による対数分岐比 r と $M^*(\alpha=0)$

β	r	M^*
0.2	2.55	2.7
0.4	2.01	3.43
0.6	1.72	4.01
0.8	1.52	4.52
1	1.38	4.98

二次元都市における式 (5.3.22) について，輸送距離弾性値 $\beta = 1$ とした場合を図 5.19，輸送量弾性値 $\alpha = 1$ とした場合を図 5.20 とする．この 2 図ともに，階層数 m が大きくなるほど施設数は減少していくが，それは対数軸において傾きが $-r$ であり，対数分岐比 r に比例した直線関係が保たれている．

図 5.19 のように輸送量弾性値 β を一定にした場合，輸送量弾性値 α が小さくなるほど，グラフは右へシフトし傾きが緩やかになり，最適階層数 M^* も大きくなっている．表 5.4 より，輸送量弾性値 α が小さくなるほど，対数分岐比 r が小さくなることが分かる．また，最適施設数 n_m^* は増加しているが，対数軸に対して線形の関係を保つように増加している．よって，輸送量に関する規模の経済性が大きくなると，階層数とともに最適な第 m 階層施設数も増加していることが分かる．

図 5.20 のように輸送量弾性値 α を一定にした場合，輸送距離弾性値 β が小さくなるほど，グラフは左へシフトし傾きが急になり，最適施設数 M^* も小さくなっている．表 5.5 より， β が小さくなるほど，対数分岐比 r が大きくなることが分かる．また，最適施設数 n_m^* は増加しているが，対数軸において直線の関係が保たれるように増加している．よって，階層数とともに最適な第 m 階層施設数も対数軸において直線の関係が保たれるように少なくなる．

5.4. 輸送システムにおける最適な階層構造の特性

よって、輸送量に関する規模の経済性が大きくなると第 m 階層施設数は増加し、輸送距離に関する規模の経済性が大きくなると第 m 階層施設数は減少することが分かった。

5.4.3 需要密度による最適な階層構造

同じ領域であっても需要の増大により、需要密度が高くなることにより輸送階層構造も変化すると思われる。ここでは、二次元都市の場合についてのみ考察する。

輸送階層数 M^*

需要量 n_0 を変化させることにより輸送需要の密度を変えた場合の最適な輸送階層数 M^* は、式 (5.3.20) より図 5.21 のようになる。輸送需要の密度が高くなるにつれて最適な階層数は増加するが、その増え方は $\log n_0$ に比例することがわかる。よって、需要の増大により階層的輸送システムは発展するが、その階層数は需要の伸びに対して高々対数程度にしか増加しないことが分かる。

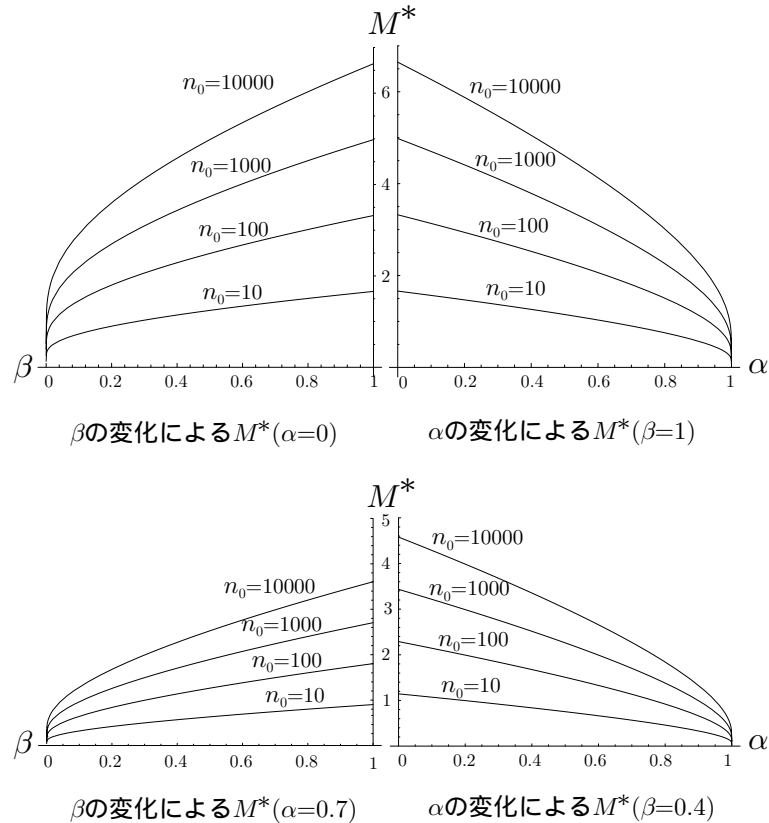


図 5.21: 需要量 n_0 による規模の経済性 α , β と最適階層数 M^* の関係

第5章 輸送システムにおける最適な中継施設の階層構造

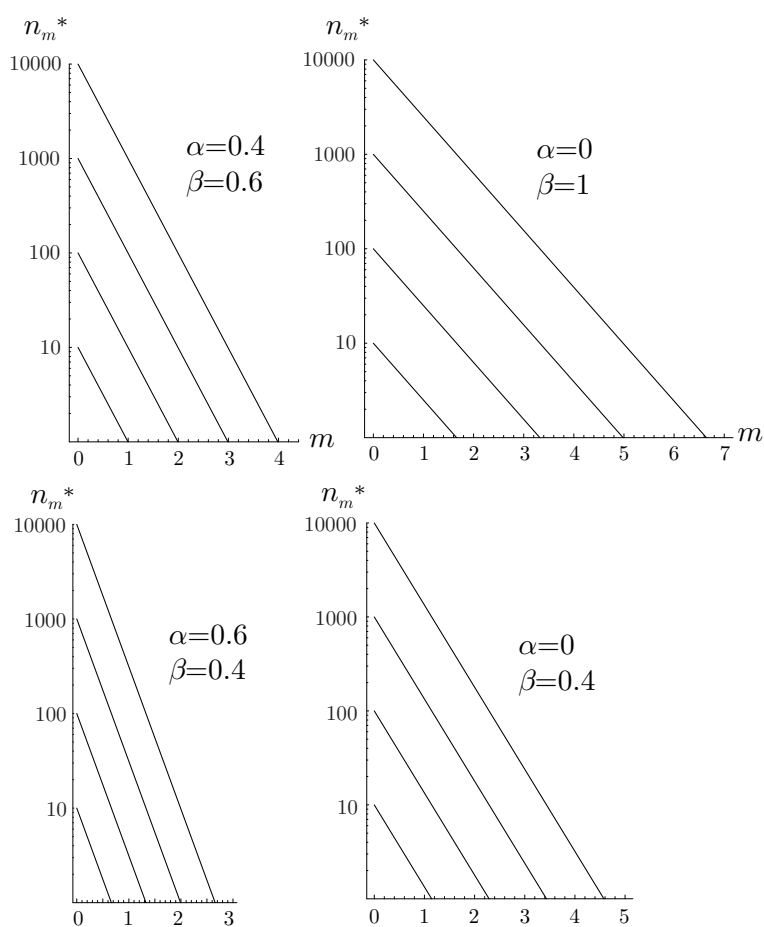


図 5.22: 需要量 n_0 による第 m 階層施設数

第 m 階層施設数 n_m^*

輸送需要の密度を変えた場合の第 m 階層施設数 n_m^* は、式 (5.3.21) より図 5.22 のようになる。需要の増大とともに階層数が高くなり、それに伴い第 m 階層での施設数も増加していることが分かる。しかし、階層数も対数程度にしか増加しないため、施設数も高々需要の対数程度にしか増加しないことが分かる。

ここで、対数分岐比 r の値を比較すると、上右図 ($r=1.38$) の方が上左図 ($r=2.31$) よりも小さいため、グラフが緩やかになっており、階層数、第 m 階層施設数ともにより多く必要になっている。

5.5 施設費用を考慮した場合の階層構造の変化

前節までは、総輸送費用の最小化のみによって最適な輸送システムを導出した。しかし、実際の輸送においては、施設を利用する場合の積替時間や施設維持費用、輸送路線数とトラック台数など、施設数の増加により発生する費用が重要な要因となる。そこで本節では、施設数の増加により増加する費用を総称した「施設費用」とし、輸送費用と施設費用を合わせた「総費用」の最小化を行う。

5.5.1 総費用の定式化

輸送費用が最小となる輸送システムである第 m 階層施設数が n_m^\dagger であるような輸送システムを基に、階層数の増加とともに増加する施設費用を考慮することによって、輸送費用と施設費用の和を最小化する階層数を求める。

まず、総施設費用の定式化を行う。一施設を追加すると増加する費用を施設費用係数 F とし、各階層の施設費用は施設数に施設費用係数を掛け合わせたものとする。総施設費用は各階層の施設費用を足しあげたものとなるので、総施設費用 C_f^\dagger を、

$$C_f^\dagger = F \int_0^M n_m^\dagger dm \quad (5.5.1)$$

と定義する。

そして、総輸送費用 C_t^\dagger に関しては、5.3 節にて式 (5.3.5) と式 (5.3.12) のように求まっている。総輸送費用 C_t^\dagger と総施設費用 C_f^\dagger との和である総費用 C^\dagger が最小になるような輸送システムを導出する。規模の経済性のパラメータ α, β の a, b への変換は表 5.2 を用いることとし、求めるべき問題を定式化すると、

$$\text{Minimize} \quad C^\dagger = C_t^\dagger + C_f^\dagger \quad (5.5.2)$$

となる。 a と b の関係による下記の場合分けにより、需要量 n_0 、最上階層施設数 n_M が所与である時に、最適となる階層的輸送システムとして階層数 M^* と第 m 階層施設数 n_m^* を導出する。

1. $a = b$: 規模の経済性について一定の関係がある場合 (5.5.2 節)
2. $a \neq b$: 規模の経済性について一般的な関係がある場合 (5.5.3 節)

第5章 輸送システムにおける最適な中継施設の階層構造

5.5.2 規模の経済性について一定の関係がある場合

$a = b$ の場合において，総施設費用は5.3.2節で導出した施設数の式(5.3.4)を式(5.5.1)に代入することにより，

$$\begin{aligned} C_f^\dagger &= F \int_0^M n_m^\dagger dm \\ &= F \int_0^M n_0 \left(\frac{n_M}{n_0} \right)^{\frac{m}{M}} dm \\ &= FM \frac{n_M - n_0}{\log \frac{n_M}{n_0}} \end{aligned} \quad (5.5.3)$$

となる．式(5.5.3)は，階層数 M の一次関数となり，階層数が増加する程，総施設費用は線形に増加することが分かる．

よって，総費用 C^\dagger は，総輸送費用である式(5.3.5)と総施設費用である式(5.5.3)の和となるので，

$$\begin{aligned} C^\dagger &= C_t^\dagger + C_f^\dagger \\ &= KM \left(\frac{n_0}{n_M} \right)^{\frac{a}{M}} + FM \frac{n_M - n_0}{\log \frac{n_M}{n_0}} \end{aligned} \quad (5.5.4)$$

となる．この式が，階層数 M について一階の条件をとると，

$$\begin{aligned} \frac{\partial C^\dagger}{\partial M} &= K \left(\frac{n_0}{n_M} \right)^{\frac{a}{M}} - KM \left(\frac{n_0}{n_M} \right)^{\frac{a}{M}} \frac{1}{M} \log \left(\frac{n_0}{n_M} \right)^{\frac{a}{M}} + \frac{F(n_M - n_0)}{\log \frac{n_M}{n_0}} \\ &= K \left(\frac{n_0}{n_M} \right)^{\frac{a}{M}} \left(1 - \frac{a}{M} \log \frac{n_0}{n_M} \right) + \frac{F(n_0 - n_M)}{\log \frac{n_M}{n_0}} \\ &= 0 \end{aligned}$$

となるので，これを解くと，

$$e^{\frac{a}{M} \log \frac{n_0}{n_M} - 1} \left(\frac{a}{M} \log \frac{n_0}{n_M} - 1 \right) = \frac{F(n_0 - n_M)}{K e \log \frac{n_M}{n_0}}$$

となる．

ここで，乗積対数関数の定義を用いて， $z = xe^x$ の逆関数を $x = W(z)$ と変形することを考える．この場合では， $x = \frac{a}{M} \log \frac{n_0}{n_M} - 1$ ， $z = \frac{F(n_M - n_0)}{K e \log \frac{n_M}{n_0}}$ と置き換えることにより，

$$\frac{a}{M} \log \frac{n_0}{n_M} - 1 = W \left(\frac{F(n_M - n_0)}{K e \log \frac{n_M}{n_0}} \right)$$

となり， M について整理すると最適な階層数 M^* は以下のように求まる．

$$M^* = \frac{a}{1 + W \left(\frac{F(n_M - n_0)}{K e \log \frac{n_0}{n_M}} \right)} \log \frac{n_0}{n_M} \quad (5.5.5)$$

5.5. 施設費用を考慮した場合の階層構造の変化

また，二階の条件から，

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 C_t^\dagger}{\partial M^2} &= -\frac{aK}{M^2} \left(\frac{n_0}{n_M}\right)^{\frac{a}{M}} \log \frac{n_0}{n_M} + \frac{aK}{M^2} \left(\frac{n_0}{n_M}\right)^{\frac{a}{M}} \log \frac{n_0}{n_M} \\ &\quad + \frac{aK}{M^2} \left(\frac{n_0}{n_M}\right)^{\frac{a}{M}} \log \frac{n_0}{n_M} \frac{aK}{M} \log \frac{n_0}{n_M} \\ &= \frac{2a^2 K}{M^3} \left(\frac{n_0}{n_M}\right)^{\frac{a}{M}} \log \frac{n_0}{n_M} > 0\end{aligned}$$

と得られ，下に凸な関数である．よって，式 (5.5.5) が最小値であることが分かった．

これを式 (5.3.4) に代入することにより，最適な階層別施設数は，

$$\begin{aligned}n_m^* &= n_0 \left(\frac{n_M}{n_0}\right)^{\frac{m}{M}} \\ &= n_0 \left(\frac{n_M}{n_0}\right)^{\frac{m}{a \log \frac{n_M}{n_0}} \left\{1 + W\left(\frac{F(n_M - n_0)}{K e \log \frac{n_M}{n_0}}\right)\right\}} \\ &= n_0 e^{-\frac{m}{a} \left\{1 + W\left(\frac{F(n_M - n_0)}{K e \log \frac{n_M}{n_0}}\right)\right\}}\end{aligned}\tag{5.5.6}$$

となる．これを両辺に対数変換することにより，

$$\log n_m^* = \log n_0 - \frac{m}{a} \left\{1 + W\left(\frac{F(n_M - n_0)}{K e \log \frac{n_M}{n_0}}\right)\right\}\tag{5.5.7}$$

となることから，対数分岐比 r は，

$$r = \frac{1}{a} \left\{1 + W\left(\frac{F(n_M - n_0)}{K e \log \frac{n_M}{n_0}}\right)\right\}\tag{5.5.8}$$

となる．

よって，最適な輸送システムでの総費用 C^* は，式 (5.5.4) より

$$\begin{aligned}C^* &= \frac{a}{1 + W\left(\frac{F(n_M - n_0)}{K e \log \frac{n_M}{n_0}}\right)} \log \frac{n_0}{n_M} \left\{K \left(\frac{n_0}{n_M}\right)^{\frac{1}{\log \frac{n_0}{n_M}} \left[1 + W\left(\frac{F(n_M - n_0)}{K e \log \frac{n_M}{n_0}}\right)\right]} + F \frac{n_M - n_0}{\log \frac{n_M}{n_0}}\right\} \\ &= \frac{a}{1 + W\left(\frac{F(n_M - n_0)}{K e \log \frac{n_M}{n_0}}\right)} \log \frac{n_0}{n_M} \left[K e^{\left\{1 + W\left(\frac{F(n_M - n_0)}{K e \log \frac{n_M}{n_0}}\right)\right\}} + F \frac{n_M - n_0}{\log \frac{n_M}{n_0}} \right]\end{aligned}\tag{5.5.9}$$

このように，施設費用を考慮した場合でも，最適な階層構造とその総費用を解析的に算出することができる．しかし，その関数は，初等関数では表すことができず， F, K, n_0, n_M を変数とする乗積対数関数を含む複雑なものとなっている．なお，施設費用が全くかからない場合 ($F = 0$)，本節で求めた階層数の式 (5.5.5)，施設数の式 (5.5.6)，総費用の式 (5.5.9) は，5.3.2 節で求めた式 (5.3.6)，式 (5.3.7)，式 (5.3.8) の結果とそれぞれ一致する．

第5章 輸送システムにおける最適な中継施設の階層構造

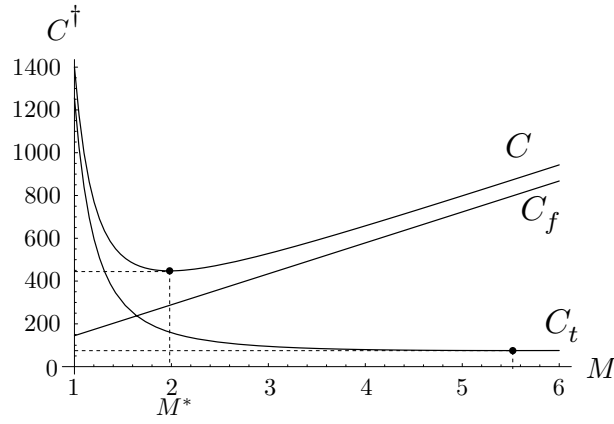


図 5.23: 総輸送費用と総施設費用による総費用最適化 ($a = b$)

ここで, $a = 0.2$ ($n_0 = 1000, n_M = 1, K = 5, F = 1$) の場合について, 総輸送費用 C_t^\dagger , 総施設費用 C_f^\dagger , 総費用 C^\dagger をプロットすると図 5.23 のようになる. 図からも分かるように, 輸送費用のみで最適となる階層数は式 (5.3.6) によると $M^* = 5.562$ となるが, 施設費用を考慮した総費用も考慮した場合の最適となる階層数 $M^* = 1.984$ となり, 図でもそれぞれの値とほぼ一致する.

5.5.3 規模の経済性について一般的な関係がある場合

$a \neq b$ の場合において, 総施設費用は 5.3.3 節で導出した施設数の式 (5.3.11) を総施設費用の式 (5.5.1) に代入することにより,

$$\begin{aligned} C_f^\dagger &= F \int_0^M n_m^\dagger dm \\ &= F \int_0^M n_0 \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1}{a-b} \left\{ m - \frac{1-(a/b)^m}{1-(a/b)^M} M \right\}} \left(\frac{n_M}{n_0}\right)^{\frac{1-(a/b)^m}{1-(a/b)^M}} dm \end{aligned}$$

となる.

よって, 総費用 C^\dagger は, 総輸送費用の式 (5.3.12) と総施設費用の式 (5.5.10) の和となるので,

$$\begin{aligned} C^\dagger &= C_t^\dagger + C_f^\dagger \\ &= K(n_0)^{a-b} \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{a}{a-b} + \frac{M}{1-(a/b)^M}} \frac{a}{a-b} \left\{ 1 - \left(\frac{b}{a}\right)^M \right\} \left(\frac{n_0}{n_M}\right)^{\frac{b-a}{1-(a/b)^M}} \\ &\quad + F \int_0^M n_0 \left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{1}{a-b} \left\{ m - \frac{1-(a/b)^m}{1-(a/b)^M} M \right\}} \left(\frac{n_M}{n_0}\right)^{\frac{1-(a/b)^m}{1-(a/b)^M}} dm \end{aligned} \quad (5.5.10)$$

この式に対して, 階層数 M について一階の条件をとると,

$$\frac{\partial C_t^\dagger}{\partial M} = 0$$

5.5. 施設費用を考慮した場合の階層構造の変化

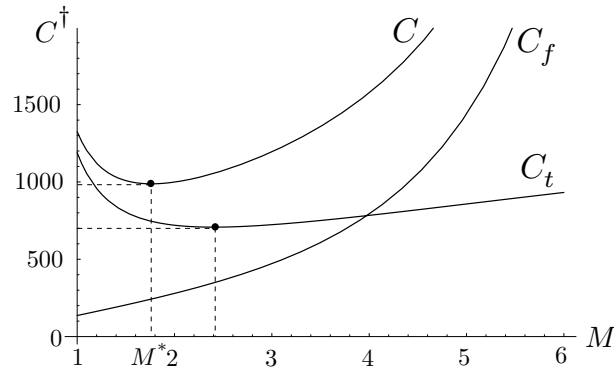


図 5.24: 総輸送費用と総施設費用による総費用最適化 ($a \neq b$)

表 5.6: 施設費用の考慮有無による最適な輸送システム

	最適費用 C^*	最適階層数 M^*
総輸送費用 C_t	707.742	2.40118
総費用 C	987.933	1.76413

と解けばよいのだが，上式を数値計算として算出するのは可能であるが，解析的に求めることは困難である．

そこで，パラメータを設定した上で，式 (5.5.10) を数値計算によって最小化する．図 5.24 は， $a = 0.3, b = 0.4 (K = 100, F = 1, n_0 = 1000, n_M = 1)$ の場合について，総費用 C^\dagger と総施設費用 C_f^\dagger ，総輸送費用 C_t^\dagger をプロットしたものである．最適階層数とその時の最適費用は，表 5.6 のようになっており，総費用最小化の方が階層数が少なくなっている．グラフより，階層数 M の増加とともに，総費用 C^\dagger は階層数 $M = 2.4$ 付近まで減少し最小値を取る．階層数 $M = 2.4$ 以上になると，総施設費用が増加するために，総費用の最適階層数は総輸送費用のみの場合よりも減少していることが分かる．

5.5.4 施設費用係数による最適な階層システムの特性

5.5.2 節，5.5.3 節の結果より，施設費用を考慮することによって，輸送費用のみを最小化する場合に比べて一般的に最適階層数が減少することが分かった．

そこで本節では，施設費用が増加することによって，階層構造が変化するかを考察する．解析的に算出することができた 5.5.2 節 ($a = b$) での結果を用いて，規模の経済性と施設費用係数による最適な階層システムの特性を考察する．以後，パラメータ a の代わりに，輸送距離による規模の経済性 β で最適な階層構造を表現する．

領域を 5.2.2(iii) 節で求めた二次元円形都市であるとする．このとき， $a = b = 1 - \alpha = \frac{\beta}{2}$ と

第5章 輸送システムにおける最適な中継施設の階層構造

なり，輸送費用係数 K は表 5.2 より，以下のように求まる．

$$\begin{aligned} K_c &= \frac{2n_0^\alpha}{\beta + 2} \left(\frac{S}{\pi} \right)^{\frac{\beta}{2}} \\ &= \frac{2n_0}{\beta + 2} \left(\frac{S}{\pi n_0} \right)^{\frac{\beta}{2}} \end{aligned} \quad (5.5.11)$$

施設費用係数による最適階層数 M^*

図 5.25 は，輸送費用係数 K_c についての式 (5.5.11) を最適階層数の式 (5.5.5) に代入したものを，施設費用係数 F と輸送距離弾性値 β についてプロットしたものである．輸送距離に関する規模の経済性が大きくなり，輸送距離弾性値 β が小さくなるほど，階層数も減少する．そして，施設費用係数が増加する程，階層数は減少することが分かる．

そして，図 5.26 では階層数の整数値についての等高線をプロットしたものである．すると，階層数が少ないために等高線が粗になっており，また $M^* = 1$ 以下となるために直行輸送を行った方がよい領域が多くなっている．

図 5.27 では，施設費用係数 F が連続的に変化する場合について，階層数をプロットしたものである． $F = 0$ という施設費用を考慮しない場合から F が増加するほど階層数も減少するが，その減少分は逓減していく．これは， F と K が初等関数ではない乗積対数関数の中に入っているため，複雑な形となる．

よって，施設費用が高くなるほど階層数は減少するが，ある程度高くなると階層数に変化を及ぼさないことが分かった．つまり，階層数が減少するということを考えると，施設費用が大きくなるということは，輸送距離の規模の経済性が大きくなるということと同義であると言

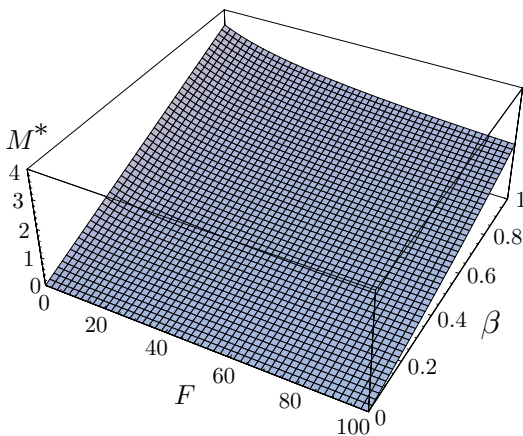


図 5.25: 施設費用係数 F と輸送距離弾性値 β による最適階層数 M^*

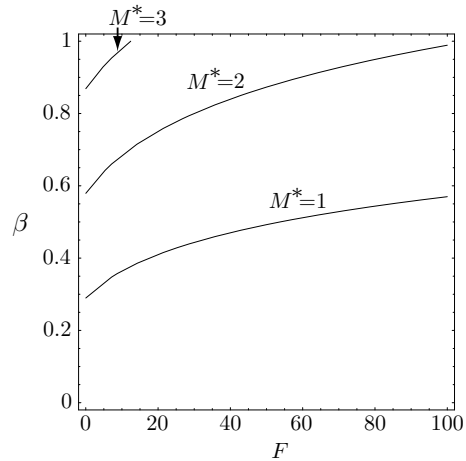


図 5.26: 施設費用係数 F と輸送距離弾性値 β による最適階層数 M^* の等高線

5.5. 施設費用を考慮した場合の階層構造の変化

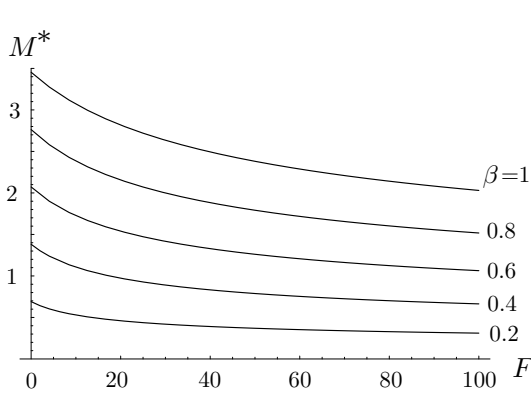


図 5.27: 施設費用 F による最適階層数 M^*

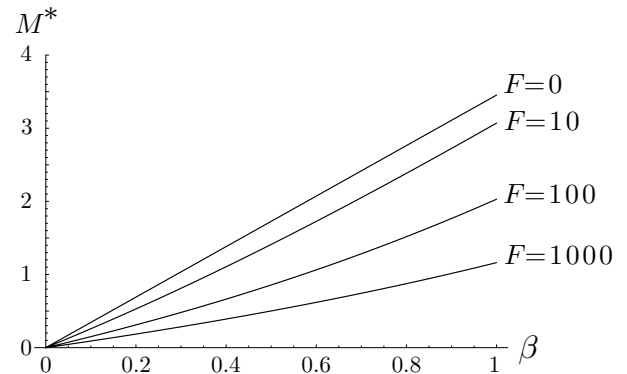


図 5.28: 輸送距離弾性値 β による最適階層数

える。

図 5.28 では、特に施設費用係数 $F = 0, 10, 100, 1000$ の場合について見てみる。輸送距離弾性値 β の変化を見てみると、施設費用 $F = 0$ の場合は輸送距離弾性値 β について線形関数であったのが、 $F > 0$ になると非線形関数となる。これは、同じ施設費用係数 F であっても、輸送距離弾性値 β が小さくなるほど K が小さくなるため、相対的に F が大きくなるために施設費用が大きくなるのと同じことが生じているため、線形よりも小さい階層数となる。そして、施設費用係数 F が増加する程に、最適階層数 M^* の増加分が逓減することが分かる。

つまり、施設費用を考慮した場合、施設費用係数 F とともに輸送距離弾性値 β が輸送費用係数 K にも影響を及ぼすため、施設費用を考慮しない場合と比べて非常に複雑な関係が見られることが分かった。

施設費用係数による最適な第 m 階層施設数 n_m^*

第 m 階層施設数 n_m^* について、施設数に対数変換を施した式 (5.5.7) により考察する。

輸送距離弾性値 $\beta = 1$ と一定にしたときに、施設費用係数 $F = 0, 10, 100, 1000$ の場合についてプロットすると図 5.29 のようになり、その数値は表 5.7 に示す。ここでは、やはり施設費用を考慮しない場合 ($F = 0$) から F が増加するほど、対数分岐比 r が大きくなるためグラフは左へシフトし傾きが急になり、最適階層数 M^* も小さくなっている。それとともに、最適施設数 n_m^* は減少しているが、対数軸において直線の関係が保たれるように減少している。よって、階層数とともに最適な第 m 階層施設数も対数軸において直線の関係が保たれるように少なくなる。

また、階層数の場合と違い、施設数は施設費用を考慮しない場合と同じく線形を保つような関数となっている。

第5章 輸送システムにおける最適な中継施設の階層構造

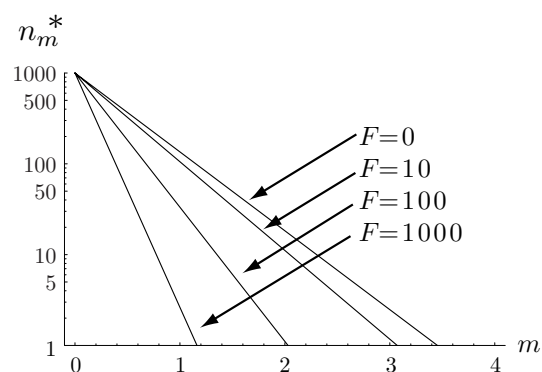


図 5.29: 施設費用係数 F による対数分岐比 r と最適階層数 $M^*(\beta = 1)$

表 5.7: 施設費用係数 F による対数分岐比 r と最適階層数 $M^*(\beta = 1)$

F	r	M^*
0	2.00	3.45
10	3.07	2.25
100	3.40	2.03
1000	5.94	1.16

よって、施設費用 F が大きくなると第 m 階層施設数は減少し、その様子は輸送距離弾性値 β が減少するのと同じであることが分かった。つまり、対数分岐比 r が一致するような輸送距離弾性値 β に設定することによって、施設費用を考慮した場合と同じ階層構造となることが可能である。

5.6 巡回型輸送における最適輸送システムの導出

前節までは、施設間を無停車で移動する直行型輸送（Single Stop）について、施設数と階層数を連続量とすることにより、輸送費用に規模の経済性が存在する場合の階層的輸送システムをモデル化した。しかし、現実の輸送では図 5.2 で見たように、複数箇所を停車して移動するような巡回移動が見られる。

そこで下記のような模式的移動経路パターンを設定し、それを図示すると、図 5.30 のようになる。

- 直行型輸送：単一停車（Single Stop），複数機材（Multi-Vehicle）
- 配送型輸送：複数停車（Multi-Stop），複数機材（Multi-Vehicle）
- 巡回型輸送：複数停車（Multi-Stop），単一機材：Single Vehicle）

配送型輸送は停車数も機材数も複数であるために、定式化が困難である。一方、巡回型輸送是一台の機材で担当領域の全ての需要点を移動するので、巡回移動の距離が求まれば定式化することができる。そして、直行型輸送と巡回型輸送の間である配送型輸送は、両方で求めた階層数の中間にあると言える。

そこで本節では、移動経路パターンの仮定を下記のように変更し、複数階層の巡回型輸送（Multi-Stop，以下 MS）の場合についてモデル化し、規模の経済性を表すパラメータによる影響を考察する。

- b') 各輸送需要の移動については、図 5.31 のような M 階層輸送を経て最上階層に到着することを考える。施設間は途中立ち寄りを行う巡回移動を行う「巡回型移動」（Multi-Stop，以下 MS）を行う。

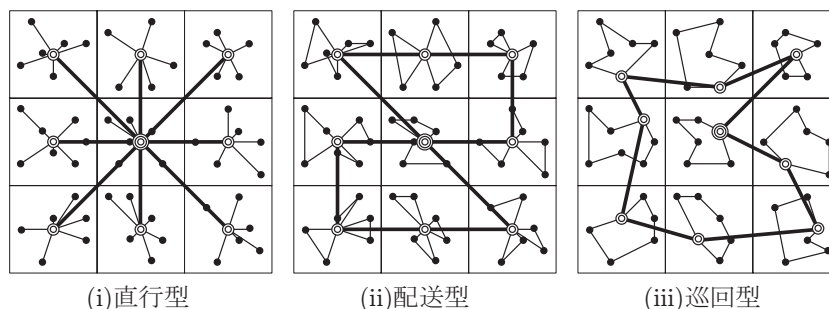


図 5.30: 輸送機材の経路選択方法

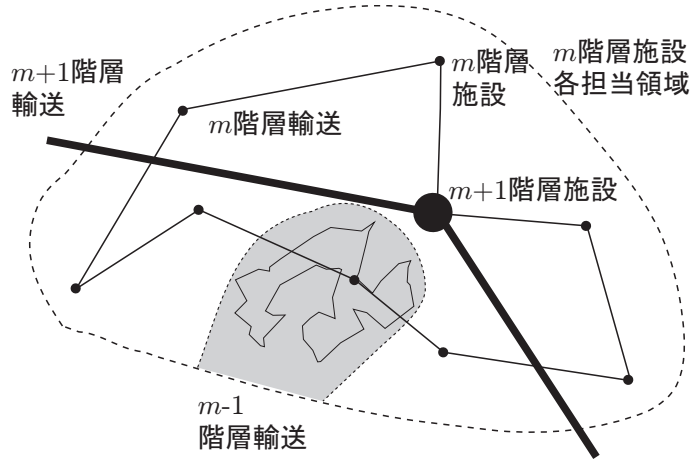


図 5.31: 二次元都市での第 m 階層での収集輸送の概要 (Multi-Stop 型)

5.6.1 巡回移動を考慮した輸送費用の定式化

各輸送需要は、図 5.31 のような収集輸送が繰り返され、 M 回の輸送を経て最上階層に到着する。その途中に必ず経由する第 m 階層施設 n_m 個 ($1 \leq m \leq M$) が均等に配置されている。

[Beardwood, Halton, Hammersley (1959)] で導出された BHH 定理により、巡回路長の近似値とする。面積 A の二次元領域において、ランダムな n 個の点を巡回する最短距離の期待値 l は、係数 k とおくと、

$$l = k\sqrt{nA} \quad (5.6.1)$$

となることが知られている。

よって、 m 階層施設からの輸送距離 l_m は、担当する領域面積 $A = \frac{S}{n_m}$ と担当する $m-1$ 階層の施設数 $n = \frac{n_{m-1}}{n_m}$ を式 (5.6.1) に代入することにより、

$$\begin{aligned} l_m &= k\sqrt{\frac{n_{m-1}}{n_m} \frac{S}{n_m}} \\ &= \frac{k\sqrt{n_{m-1}S}}{n_m} \end{aligned} \quad (5.6.2)$$

となる。 m 階層輸送での輸送量は、トラックの積載容量と考えられる。領域内で担当する全輸送需要なので、

$$q_m = \frac{n_0}{n_m} \quad (5.6.3)$$

となる。

第 m 階層の輸送費用は、規模の経済性を考慮した輸送量 q_m (輸送量弾性値 α) と輸送距離 l_m (輸送距離弾性値 β) の積によって決定され、施設数 n_m を乗ずることで

表 5.8: パラメータの置換 (巡回移動)

	c_m	K	a	b	次元
(i)	c_m^l	$K_l = n_0^\alpha \frac{1}{\beta+1} \left(\frac{L}{2}\right)^\beta$	$1 - \alpha$	β	一次元 SS
(ii)	c_m^k	$K_k = \frac{2n_0^\alpha k}{S(\beta+2)} \left(\frac{S}{k \tan \frac{\pi}{k}}\right)^{\frac{\beta}{2}+1} \int_0^{\frac{\pi}{k}} (\sec \theta)^{\beta+2} d\theta$		$\frac{\beta}{2}$	二次元 SS
(iii)	c_m^c	$K_c = \frac{2n_0^\alpha}{\beta+2} \left(\frac{S}{\pi}\right)^{\frac{\beta}{2}}$			
(iv)	c_m^r	$K_r = \frac{2n_0^\alpha S^{\frac{\beta}{2}}}{(\beta+1)(\beta+2)} \left(2 - \frac{1}{2^\beta}\right)$			
(v)	c_m^p	$K_p = n_0^\alpha k^\beta S^{\frac{\beta}{2}}$	$\frac{\beta}{2}$	$\alpha + \beta - 1$	二次元 MS

$$\begin{aligned}
c_m^p &= n_m q_m^\alpha l_m^\beta \\
&= n_m \left(\frac{n_0}{n_m}\right)^\alpha \left(\frac{k \sqrt{n_{m-1} S}}{n_m}\right)^\beta \\
&= n_0^\alpha k^\beta S^{\frac{\beta}{2}} \frac{n_{m-1}^{\frac{\beta}{2}}}{n_m^{\alpha+\beta-1}}
\end{aligned} \tag{5.6.4}$$

のように求まる．

式 (5.6.4) について，表 5.2 のように規模の経済性のパラメータ α, β と輸送費用係数を a, b, K へ置き換えることで，輸送費用について領域形状によらずに一般化表記ができる．ここで， a, b の値域が α, β の定義域によって異なるので，(i) を「一次元 SS」，(ii)(iii)(iv) をまとめて「二次元 SS」と呼ぶこととする．

これにより，各階層の輸送費用の式 (5.6.4) は，式 (5.2.6) と同じ形に帰着する．

よって，総輸送費用の式 (5.2.7) と同じになるので，5.3 節で導出された結果を用いることができる．ただし， α, β それぞれの定義域は， $a > 0, b > 0$ も考慮すると， $0 \leq \alpha \leq 1, 0 < \beta \leq 1, \alpha + \beta > 1$ となる．

5.6.2 巡回型輸送における最適な階層数と施設数の算出

5.3 節において，総輸送費用についての式 (5.2.7) は極値を持つことが確認されており，場合分けにより下記のように求まる．

定義域は $0 \leq \alpha < 1, 0 < \beta \leq 1$ であるが， $a = b$ すなわち $\alpha + \beta/2 = 1$ の場合は α, β の定義

第5章 輸送システムにおける最適な中継施設の階層構造

域より, $\frac{1}{2} \leq \alpha < 1, 0 < \beta \leq 1$ となる. このとき,

$$M^* = \begin{cases} \frac{\beta}{2} \log \frac{n_0}{n_M} & \text{if } \alpha + \frac{\beta}{2} = 1, \\ \frac{\alpha + \beta/2 - 1}{\log \frac{\alpha + \beta - 1}{\beta/2}} \log \frac{n_0}{n_M} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.6.5)$$

$$n_m^* = \begin{cases} n_0 e^{-\frac{2m}{\beta}} & \text{if } \alpha + \frac{\beta}{2} = 1, \\ n_0 \left(\frac{\beta/2}{\alpha + \beta - 1} \right)^{\frac{m}{\alpha + \beta/2 - 1}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.6.6)$$

となる. そして, 最適となる第 m 階層施設数 n_m^* である式 (5.3.21) について両辺を対数変換すると,

$$\log n_m^* = \begin{cases} \log n_0 - \frac{2}{\beta} m & \text{if } \alpha + \frac{\beta}{2} = 1, \\ \log n_0 - \frac{m}{1 - \alpha - \beta/2} \log \frac{\beta/2}{\alpha + \beta - 1} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.6.7)$$

となり, とともに階層数 m に関する一次減少関数となる.

二次元 MS の対数分岐比 r を求めて, 表 5.3 の結果に追加すると, 表 5.9 になる.

表 5.9: 領域次元による対数分岐比 r (巡回移動)

	一定の関係の場合 ($a = b$)	一般の場合 ($a \neq b$)
一次元 SS	$\frac{1}{\beta} \left(= \frac{1}{1 - \alpha} \right)$	$\frac{1}{1 - \alpha - \beta} \log \frac{1 - \alpha}{\beta}$
二次元 SS	$\frac{2}{\beta} \left(= \frac{1}{1 - \alpha} \right)$	$\frac{1}{1 - \alpha - \beta/2} \log \frac{1 - \alpha}{\beta/2}$
二次元 MS		$\frac{1}{1 - \alpha - \beta/2} \log \frac{\beta/2}{\alpha + \beta - 1}$

5.6.3 巡回型輸送における最適な階層構造の特性

直行型移動 (SS) と巡回型移動 (MS) について, 規模の経済性 α, β の変化による最適な階層数 M^* と階層別施設数 n_m^* について考察する.

なお本節の数値計算例は, 需要量 $n_0 = 1000$, 最上階層施設数 $n_M = 1$ としているが, 一般性は失われない.

最適階層数による比較

図 5.32 は, 最適階層数の式 (5.6.5) を図示したものである. 輸送距離弾性値 β が減少するほど, 階層数が急速に減少する. 一方, 輸送量弾性値 α が減少する程, 二次元 SS とは反対に階

5.6. 巡回型輸送における最適輸送システムの導出

層数は減少する．これは，なるべく大きな輸送機材を使おうとするために，巡回点数が多くなり，階層数が減少すると考えられる．

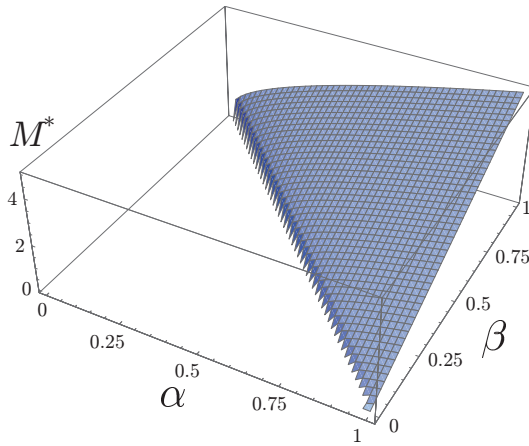


図 5.32: 規模の経済性 α, β による最適階層数 M^* (二次元 MS)

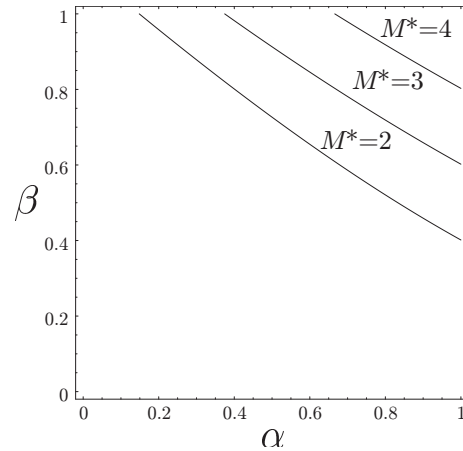


図 5.33: 規模の経済性 α, β による最適階層数 M^* の等高線 (二次元 MS)

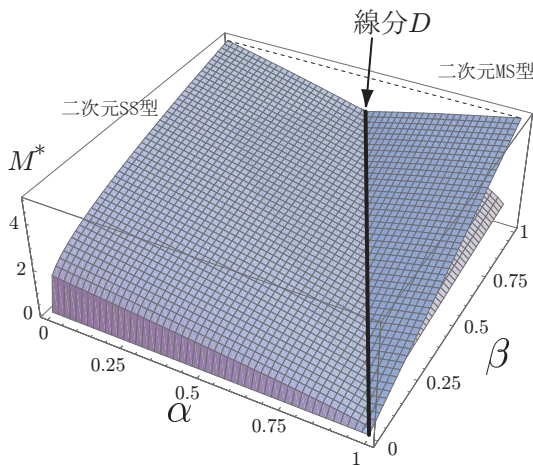


図 5.34: 規模の経済性 α, β と最適階層数 M^* の関係 (二次元 SS・MS)

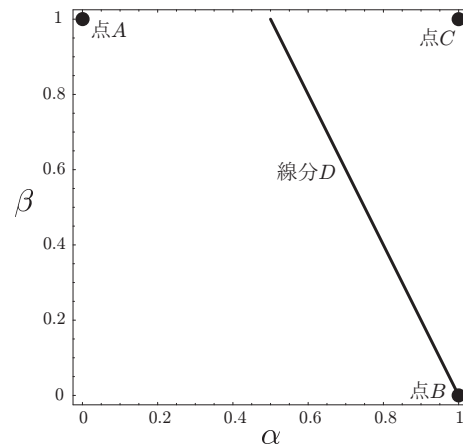


図 5.35: 規模の経済性 α, β と各指標の関係

図 5.34 は，最適階層数に関する図 5.32 (二次元 MS) と図 5.16 (二次元 SS) を重ねて図示したものである．二次元 SS と二次元 MS が同じ階層数となる線分 D ($\alpha + \beta/2 = 1$) を境に，階層数は逆転する．

図 5.35 は，表 5.10 のような物流において用いられる主な指標を， (α, β) 平面にプロットしたものである．表 5.10 では各指標における最適な階層数をまとめている．二次元 MS において，重量のみ (点 A)・距離のみ (点 B) の場合では階層構造が生じないが，重量距離 (点 C) では階層構造が生じる．

表 5.10: 各指標による最適階層数 M^*

	指標	α	β	二次元 MS	二次元 SS	一次元 SS
点 A	距離基準 (キロ)	0	1	0	$\frac{1}{2 \log 2} \log \frac{n_0}{n_M}$	$\log \frac{n_0}{n_M}$
点 B	重量基準 (トン)	1	0	0		
点 C	距離重量基準 (トンキロ)	1	1	$\frac{1}{2 \log 2} \log \frac{n_0}{n_M}$	0	
線分 D	一定の関係 (a=b)	$\alpha + \frac{\beta}{2} = 1$		$\frac{\beta}{2} \log \frac{n_0}{n_M}$		$\beta \log \frac{n_0}{n_M}$

5.7 現実の輸送における階層構造の考察

本節では、各国の郵便事業体による小包輸送を例に、輸送費用を最小化する輸送システムにより、現実の輸送システムとの階層構造の考察を行う。

宅配便は全国を対象としたサービスであり、本章で仮定している需要が十分大きいことを満たしていると考えられる。そこで、現実の収集 (many-to-one demand)・配送 (one-to-many demand) の場合について、最適な階層構造を導出して、現状の輸送システムと比較する。そして、輸送費用から計測した規模の経済性 α β を用いることによって、現状の輸送についての特性を考察することとする。

なお、第 m 階層施設数はそれぞれの輸送において本文中で定義したものとし、施設と需要は領域に一樣に分布し輸送過程は必ず一つずつ階層を経ることを仮定する。よって、現実の輸送過程を詳細に記述したものではない。

5.7.1 対象とする各国の概要

世界の郵便ネットワークの調査では、[岩間, 佐藤, 田中 (1998)] において日本・アメリカ・ドイツ・オランダのシステムについて比較を行っており、本節ではここで紹介されているデータを用いるためこの4カ国を対象とする。

対象とする各国の社会情勢と郵便に関する状況は、表 5.11 のようになる。数値ではアメリカが最も多いが、非常に広い国土のため、密度で見ると非常に低くなることが分かる。郵便物が多いほど郵便局数は多くなるが、郵便物の倍数ほどには郵便局数に差が見られないことが分かる。国土面積や郵便物数、小包数の点から、日本とドイツは非常に近い値である。

郵便輸送については、ドイツにおいては東西統一、オランダにおいては鉄道からトラック輸送へのシフトといった要因により、郵便輸送ネットワークの再構築が行われているという。さらに近年では、ドイツとオランダでは郵便事業体の民営化が行われており、民間の物流企業との合併が行われるなど、郵便輸送に関する環境の変化が著しい。日本においても 2003 年に日本郵政公社が誕生し、さらに郵政民営化が決定され、今後の郵便輸送の大きな変化が予想される。

表 5.11: 各国の概要 (1996 年)

	面積 (万 km ²)	人口 (万人)	郵便物総数 (億通/年)	小包総数 (百万通/年)	郵便局数
アメリカ	966.70	26,065	1,827	960	38,212
ドイツ	35.70	8,200	201	541	16,172
日本	37.80	12,496	254	386	24,638
オランダ	4.10	1,552	62	80	2,679

第5章 輸送システムにおける最適な中継施設の階層構造

5.7.2 需要量・施設数のデータ

本節では、小包輸送について [岩間, 佐藤, 田中 (1998)] による各国のデータを用いて分析を行う。表 5.12 は各国のデータの出典で、表 5.13 は [岩間, 佐藤, 田中 (1998)] において紹介されているデータより作成した。なお、需要量 n_0 は表 5.11 における小包総数をそれぞれの年間取扱総数を一日平均数へ変換したものをを用いている。

図 5.36 は、第 m 階層施設数 n_m として表 5.13 の数値をプロットしたものである。これより、アメリカとドイツは 2 階層輸送で、オランダと日本は 3 階層輸送となっており、階層が高くなるほど、施設数が減少していることが分かる。[岩間, 佐藤, 田中 (1998)] によると、ドイツ、オランダでは小包は一般郵便物とは別の輸送ネットワークによって行われている一方、日本、アメリカでは 2 階層以降は一般郵便物と同じ輸送ネットワークにおいてが行われている。

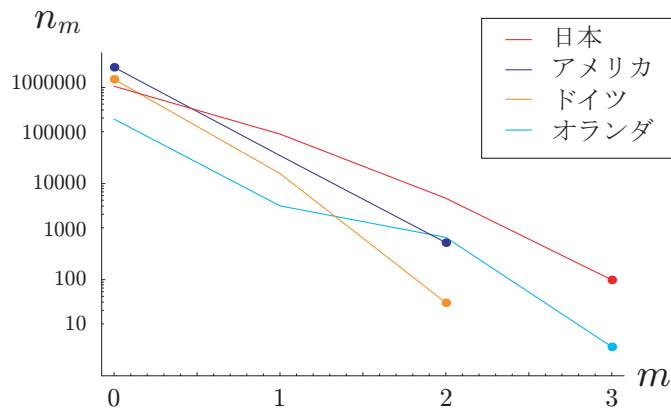
需要量の少ない日本とオランダが、需要量の多いアメリカとドイツよりも輸送階層数が小さく、日本とドイツの比較では、需要量としては近いが、輸送システムが大きく異なることが分かる。つまり、現実の輸送では、需要量以外の要因でも輸送システムが構築されていることが推測される。

表 5.12: 各国小包輸送におけるデータの出典

m 階層	0	1	2	3
アメリカ (1996 年)	一日当り 取扱数	ポスト, 郵便局	地域区分局	
ドイツ (1996 年)	一日当り 取扱数	ポスト, 郵便局	区分局 (レター)	
日本 (1998 年)	一日当り 取扱数	郵便局, 取扱店	集配局	地域区分局
オランダ (1996 年)	一日当り 取扱数	ポスト, 郵便局	集配局	区分局 (レター)

表 5.13: 各国小包輸送における需要量と第 m 階層施設数

	n_0	n_1	n_2	n_3
アメリカ	2,629,285	38,212	589	
ドイツ	1,482,192	16,172	33	
日本	1,058,690	107,048	4,944	99
オランダ	219,178	3,437	758	4

図 5.36: 各国小包輸送における需要量と第 m 階層施設数

5.7.3 輸送費用の推定

運賃を用いることにより，人件費や車両・燃料費用，施設費用といった輸送に関わる総合的な費用を考慮することができる．外部委託や 3PL(Third Party Logistics：物流システムの外注化)などの進展により，支払い運賃を最小化することも輸送システム構築において重要であると考えられる．

そこで，物流コストの国際比較を目的とした [国土交通省 (2002)] における「トラックの運賃の比較・為替レート (報告書図表 III-1)」を利用する．各国の経済状況により基準化しており，輸送距離別 (5 区分)，輸送重量別 (5 区分) の区分で，複数事業者の運賃の平均値をとっている．

輸送距離・輸送量によって輸送費用が決定されているとき，輸送費用は式 (5.2.1) で示したような規模の経済性を考慮した定式化を行った．つまり輸送費用 C は，輸送量 q ，距離 l ，係数 K とともに，規模の経済性を表すパラメータとして，輸送量弾性値 α ，輸送距離弾性値 β を用いて，

$$C = Kq^{\alpha}l^{\beta}$$

のような輸送量と輸送距離のべき関数で表すこととする．この非線形の式に対して，料金表の各距離帯・重量帯毎の運賃を準ニュートン法による最小二乗法を用いて回帰分析を行うと，パラメータ推定結果は次の表 5.14 のようになる．決定係数を見ても，かなり高い説明力であると言える．

規模の経済性の推定結果について，図 5.35 の上にプロットすると図 5.37 のようになる．日本は， α, β の値がともに値が一番大きく，固定費用 K が最も小さいことから，輸送費用に関する規模の経済性があまり効いていない．さらに線分 D (一定の関係) 上にあることから，他の国とはかなり異なった輸送費用の構造であることが分かる．

第5章 輸送システムにおける最適な中継施設の階層構造

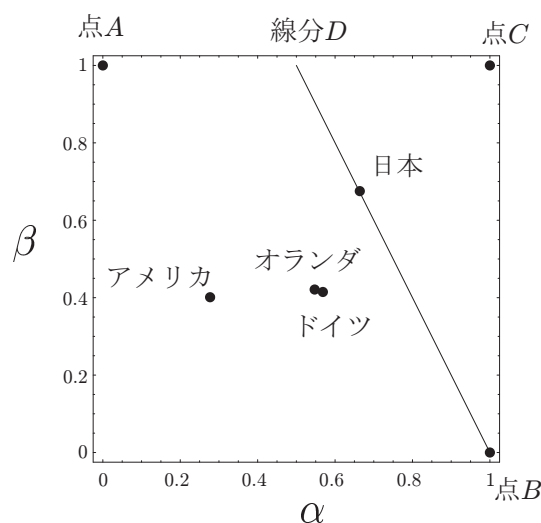


図 5.37: 規模の経済性に関するパラメータ

アメリカは，規模の経済性のパラメータ α, β の値がともに値が一番小さく，特に輸送量弾性値 α が他の国に比べて非常に小さい．さらに，固定費用 K が最も大きいことから，輸送費用に関する規模の経済性がかなり効いている．

ドイツとオランダは同じ欧州にあるものの，表 5.11 で見たように国土や郵便需要について規模は大きく異なる．しかし， α, β ともに非常に近い値であり，日本とアメリカの間にある．

輸送距離弾性値 α については，アメリカが他の国に比べて非常に小さく，日本とドイツ，オランダは 0.6 前後でやや近い値である．輸送距離弾性値 β については，アメリカとドイツ，オランダが 0.4 程度で非常に近い値であり，日本はそれよりもかなり大きい．

5.7.4 階層数と施設数に関する国際間比較

表 5.15 は，小包輸送について対数分岐比の理論値と実測値である．

理論値である二次元 SS の対数分岐比 r_{SS} ，二次元 MS の対数分岐比 r_{MS} は，表 5.9 にある対数分岐比の式に表 5.14 の値を代入することにより求まる．二次元 SS の対数分岐比 r_{SS} では，各国ともにほぼ 3 で近い値をとる．一方，二次元 MS の対数分岐比 r_{MS} では，日本以外は定義

表 5.14: 規模の経済性に関するパラメータ推定結果

	K	α	β	R^2
アメリカ	636.787	0.227	0.401	0.923
ドイツ	29.483	0.569	0.415	0.982
日本	2.915	0.664	0.675	0.989
オランダ	48.033	0.547	0.421	0.971

表 5.15: 各階層輸送での対数分岐比 r (小包輸送)

	r_{SS}	r_{MS}	r_1	r_2	r_3
アメリカ	2.454	—	4.231	4.356	
ドイツ	3.269	—	4.518	6.194	
日本	2.955	2.956	2.291	3.082	4.092
オランダ	3.161	—	4.404	1.262	5.244

表 5.16: 各国小包輸送における最適階層数 M^*

	二次元 SS	二次元 MS
アメリカ	3.42389	0
ドイツ	3.27667	0
日本	3.12537	3.13978
オランダ	3.45164	0

域外にあるため、これら 3 カ国では階層輸送が行われないことがわかる。

一方、実測値である実際の需要量・施設数による対数分岐比は、

$$r_m = \log \frac{n_{m-1}}{n_m} \quad (5.7.1)$$

のように定義する。図 5.36 においても、各階層数 m により直線の傾きが異なることから、対数分岐比が異なると分かる。

第 1 階層輸送の対数分岐比 r_1 は、日本だけが $r_{SS} > r_1$ であり、諸外国では第 1 階層の施設数が突出して多いという現象は見られない。日本では、小包が宅配便との競争が進むことにより荷物を引き受ける施設の数が増加しており、利用者が持ち込む過程の利便性が大きくなっていることが分かる。

第 2 階層輸送の対数分岐比 r_2 は、オランダだけが $r_{SS} > r_2$ である。アメリカ、ドイツともに、 $r_{SS} < r_1 < r_2$ という関係が見られ、二次元 SS よりも集約の度合いが高い。

表 5.16 は、現状の最上位施設まで運ぶ場合の最適階層数である。各国ともに二次元 SS ではほぼ 3 階層が最適である結果が分かる。MS では、日本が 3 階層に対して、他の欧米各国は直送であることが分かる。つまり、二次元 SS と二次元 MS の中間の輸送システムを構築する場合は、階層数は最高でも 3 階層であることが分かる。

図 5.38、図 5.39 より、2 階層輸送で行われているアメリカ・ドイツの結果を見ると、二次元 SS よりも施設数がかなり少なく、直行である二次元 MS との中間にあることが分かる。

図 5.40、図 5.41 より、3 階層輸送で行われている日本・オランダの結果を見ると、日本は二次元 SS と二次元 MS にほぼ同じ傾向が見られ、オランダでは二次元 SS にほぼ同じ傾向が見られることが分かる。

第5章 輸送システムにおける最適な中継施設の階層構造

これより、3 階層輸送が行われている場合は輸送費用最小化による物流システムが構築されているが、近年改革の進んでいる 2 階層輸送の場合は輸送費用だけでは説明できないコスト要因（在庫費用や納期短縮）を主眼としていることが推測される。

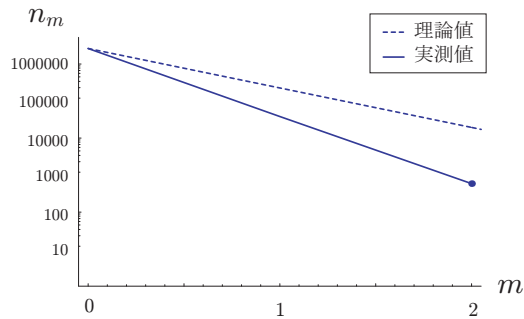


図 5.38: 小包輸送での第 m 階層施設数（アメリカ）

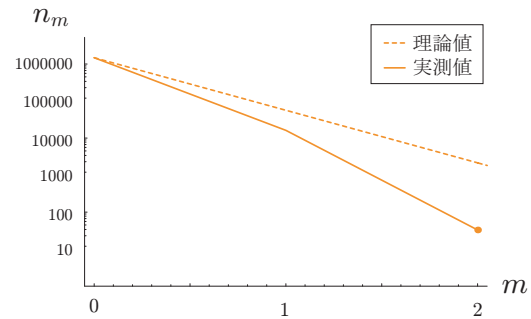


図 5.39: 小包輸送での第 m 階層施設数（ドイツ）

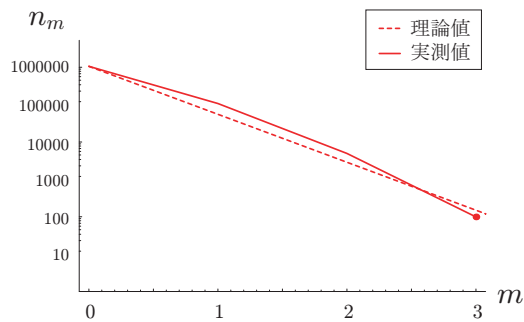


図 5.40: 小包輸送での第 m 階層施設数（日本）

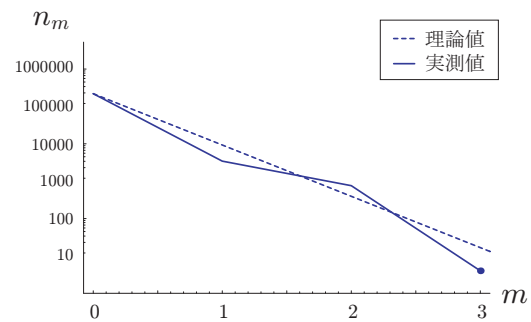


図 5.41: 小包輸送での第 m 階層施設数（オランダ）

5.8 まとめ

本章では、輸送費用において、輸送量と輸送距離の増加によって輸送費用の増加分が逓減する「規模の経済性」を考慮し、領域形状や集配経路の違いによる定式化を行った。そして、輸送費用を最小化する階層数と各階層での施設数を導出し、規模の経済性や需要量といったパラメータによる最適輸送システムの変化について考察を行った。

その結果、下記のことが明らかになった。

- 集配経路が直行型移動（SS）をする場合、最適な輸送階層数について、輸送量に関する規模の経済性が大きくなるほど増加し、輸送距離に関する規模の経済性が大きくなるほど減少する。同じ需要量であっても、一次元都市は二次元都市より階層数は多く必要となる。
- 最適な途中階層の施設数は、階層数の増加に伴い、施設数の対数軸に対して直線の関係を保つように増加する。需要が増加すれば階層数も増加するが、最上階層 1 施設当りの最下階層施設数（需要）の対数に比例する程度にしか増加しない。
- 施設費用を考慮した場合、輸送費用に対する施設費用が大きくなるほど、最適な階層数、各階層毎施設数は減少する。これは、施設立地などの固定費が増加により、階層システムが変化することが分かった。
- 集配経路が巡回型移動（MS）をする場合、輸送量・輸送距離に関する規模の経済性が大きくなるほど輸送階層数は減少する。この結果は、直行型移動をする場合と比べて、輸送量に関する規模の経済性では逆の結果となっている。また、最適な途中階層の施設数は、階層数の増加に伴い、施設数の対数軸に対して直線の関係を保つように増加する。
- 日本・世界各国での小包輸送の施設数を用いて、最適輸送システムとの比較を行った。現実の輸送費用より規模の経済性パラメータの推計を行い、各国ともに輸送費用に規模の経済性があることを確認した。そして、最適な階層数は二次元 SS 型では各国ともに 3 階層程度、二次元 MS 型では日本を除いて階層輸送をしない直送となった。現実の 2 階層輸送はその中間であることから、物流システムの構築には輸送費用以外の要因も影響することが推測される。

本章では、輸送費用における規模の経済性と輸送階層数の関係に着目するために、集配経路や需要において強い仮定を置いた。そのため、本章の結果から現実の輸送システムへより説明力を高めるには、下記のような問題が残されている。

集配経路が全ての階層で等しいことについては、集配経路が直行型と巡回型によって、輸送階層数の上限と下限を押さえることができた。しかし、現実の輸送では、国土レベルの階層の

第 5 章 輸送システムにおける最適な中継施設の階層構造

高い輸送においては直行移動が見られるが，個人宅を中心とした階層の低い輸送においては巡回移動が多く見られる．これより，直行型と巡回型の中間である集配経路を設定し，階層によって集配経路が異なるモデルを構築する必要がある．

第6章 おわりに

物を如何にして運ぶか？

これは、人類にとって永年の問いであろう。時間・空間を隔てる要因を徐々に取り除くべく弛まぬ努力を行い、徒歩から自動車、鉄道、船、飛行機へと輸送機関の発達していった。その一方、会話からのろし、電話、電報、インターネットへと通信機関も発達していき、今や世界中の情報を瞬時に手に入れることができる。このような広い意味での交通とは、人と人を結びつけるコミュニケーションを深めるための手段に過ぎないのかもしれない。

しかし、どんなに通信が発達しても、「物を運ぶ」という輸送はなくならないであろう。そこで本研究を通じて、局所的観点から見た近接性から全体的観点から見た最適性へ、人類の進化による交通網の構築原理が変化してきたことに対して、交通網を対象として離散空間モデルと連続空間モデルの両方の観点から、交通網の形態解析と移動利便性に関する基礎的な分析を行った。

まず、近接性からみたネットワークを構築し、形態的特性と移動利便性の性質を把握し、都市内道路網の形態解析を行い道路の構築原理を把握した。ネットワーク形態では、格子状点分布において構築される相対近傍グラフと直交距離との移動距離における類似性を確かめた。そして、日米主要都市での道路網の分析からも、相対近傍グラフによって格子状道路網で構成されている都市を分類できたことから、現実都市においても同様の関係が見られたことを確認した。

そして、連続空間を移動する数理モデルから、連続近似モデルを用いて最適な輸送システムを構築した。都市空間における交通施設に関して、最適な線的施設として格子状道路網における最適な高速交通網の形態、点的施設として輸送システムにおける最適な中継施設の階層構造について、密度と配置を連続近似することにより解析的に求めた。格子状道路網では、移動時間と通行量による道路網間隔の最適化を行い、混雑現象を考慮することで領域形状が細長くなるほど交通ネットワークが必要になることを確認した。そして階層輸送システムについては、輸送費用における規模の経済性の考慮による最適な階層構造を導出し、経路選択による違いにより異なる階層構造が導出された。

本章では、これまで本研究で得られた結論と今後の課題についてまとめる。

第6章 おわりに

6.1 本研究の結論

以下、各章における本研究の主要な結果をまとめる．

第2章

第2章では、都市内の各種ネットワークを点と線で模式的に表すために、グラフとして定義し、点の近接性により線を生成する各種近接グラフを構築する方法をまとめた．近接グラフと関連したグラフの形態的特徴を比較するために、構築された辺の長さ和本数に関して考察を行った．グラフ上の移動距離について移動距離分布と直線距離との比について、既存の直線距離と直交距離による連続移動モデルによって得られた結果との比較を行った．

その結果、下記のことが明らかになった．

- 近接グラフの構築における点の探索領域の違いにより、新たに相対近傍グラフと最小木の辺の長さを推定し、最近傍グラフとドロネー網の中間の辺の長さとなる．そして、孤立最近接対（RP）からドロネー網（DT）へと近接性から見た点の探索領域が狭くなるにつれて、長い辺が増える．
- 移動距離分布に関して、ランダム点における相対近傍グラフ（RNG）は、格子状道路網を表す直交距離の理論的な距離分布及び平均値ともに近い．しかし、直線距離との比に関しては、比の平均については格子状道路と相対近傍グラフの性質に近いが、比の分布に関しては、近接グラフと理論式の結果は大きく異なる．
- グラフの総延長と移動距離の関係に関して、最小木（MST）から相対近傍グラフ（RNG）へと延長が長くほど移動距離は急減するが、ガブリエルグラフ（GG）とドロネー網（DT）へとさらに長くなっても距離の減少量は逡減となる．また、理論的距離とグラフの比較により、直交距離に値に近い相対近傍グラフから、直線距離に値に近いドロネー網と同じ移動距離の利便性へ近づくためには、相対近傍グラフの4倍程度の長さが必要である．

第3章

第3章では、点間の近接性により構築されるグラフを用いた都市内道路網の形態解析を通じて、模式的道路網パターンとの比較による都市空間における複雑な道路網パターンの構築原理の把握を行った．既存の形態指標（Grid-Tree Proportion, Crossing Factor）を紹介して、上記都市データと各種の規則的的道路網との比較を行い指標の性質に関する考察を加えた．各道路が連結されている構成原理として交差点間の近接性に着目し、道路網から道路点を抽出してグラフを構築し、道路辺との重ねあわせによって構築原理を明らかにした．道路網とグラフの関

係を明確にするために、一致する辺の数を「構成比率」として定義し、本指標を用いて国内外主要都市の道路網と比較した。これらの分析を通して、相対近傍グラフなど近接グラフによる道路網形態解析の有効性が明らかになった。

その結果、下記のことが明らかになった。

- 規則的点分布におけるグラフにより、都市計画における模式的道路網パターンである各種格子状道路を構築できる。特に代表的な正方格子状道路は、正方格子の点分布における相対近傍グラフ（RNG）により構築することができる。
- つくばセンターでの分析により、格子状道路網で構成される街区において相対近傍グラフで構築できる道路辺が多く見られた。そしてほとんどの区画道路は、ドローネ網（DT）と約 97% 近くの本数が一致することから、近接性によって道路網が構築できる。一方、幹線道路や地形などでパターンが崩れている部分では、近接性だけでは構築できない道路辺が多く見られた。
- 日本の都市内道路網を用いて、既存の形態指標により、結合性の指標である GTP によると上野、道路密度の指標である CF によると名古屋が高く評価された。一方、本章で提案した道路構成比率による都市間比較から、札幌において相対近傍グラフで構築したグラフ辺と一致する割合が高くなり、市街地の区画道路において格子状道路が整備されている都市を評価できた。
- 米国における都市内道路網の分析を行い、既存指標を用いると New York が最も高く評価された。そして、道路構成比率の分析から、Denver が相対近傍グラフで構築したグラフ辺と一致する割合が高くなり、格子状道路網が整備されている都市を評価できた。

第 4 章

第 4 章では、矩形領域内における高速移動できる格子状道路ネットワークを等間隔に配置するモデルの定式化を行った。交通サービス水準として、全体の移動利便性を表す平均移動時間と特定区間の混雑水準を表す最大通行量という 2 つの評価指標を設定し、領域形状の形状比率とネットワーク本数比率、ネットワーク長により、それぞれの基準から見た領域形状の違いによる最適な格子状道路網の形態を導出した。

その結果、下記のことが明らかになった。

- 平均移動時間を基準にした場合、全てのリンクが同じ長さとなる正方格子状ネットワークが最適な形態となる。平均移動時間を同一水準にするためには、領域形状が細長くなるほど、より長いネットワークが必要である。そして、細長い領域では、どんなに長くしても到達できない水準が存在する。

第6章 おわりに

- 最大通行量を基準にした場合は、領域形状と比例した配置となる相似格子状ネットワークが最適な形態となる。最大通行量を同一水準にするためには、領域形状が細長くなるほど、より長いネットワークが必要となるが、平均移動時間の場合ほど長いネットワークは必要としない。
- 通行量により移動時間が変化する混雑現象を考慮することにより、平均移動時間を最小にするネットワーク形態は、正方格子状ネットワークと相似格子状ネットワークの中間の形態になる。ネットワーク長が長いほど、相似格子状ネットワークに近い形態となることから、最大通行量を少なくすることが目的となる。平均移動時間を同水準にするには、混雑がない場合と比べて細長くなるほど、より長いネットワークが必要になる。

第5章

第5章では、輸送費用において、輸送量と輸送距離の増加によって輸送費用の増加分が逓減する「規模の経済性」を考慮し、領域形状や集配経路の違いによる定式化を行った。そして、輸送費用を最小化する階層数と各階層での施設数を導出し、規模の経済性や需要量といったパラメータによる最適輸送システムの変化について考察を行った。

その結果、下記のことが明らかになった。

- 集配経路が直行型移動（SS）をする場合、最適な輸送階層数について、輸送量に関する規模の経済性が大きくなるほど増加し、輸送距離に関する規模の経済性が大きくなるほど減少する。同じ需要量であっても、一次元都市は二次元都市より階層数は多く必要となる。
- 最適な途中階層の施設数は、階層数の増加に伴い、施設数の対数軸に対して直線の関係を保つように増加する。需要が増加すれば階層数も増加するが、最上階層1施設当りの最下階層施設数（需要）の対数に比例する程度にしか増加しない。
- 施設費用を考慮した場合、輸送費用に対する施設費用が大きくなるほど、最適な階層数、各階層毎施設数は減少する。これは、施設立地などの固定費が増加により、階層システムが変化することが分かった。
- 集配経路が巡回型移動（MS）をする場合、輸送量・輸送距離に関する規模の経済性が大きくなるほど輸送階層数は減少する。この結果は、直行型移動をする場合と比べて、輸送量に関する規模の経済性では逆の結果となっている。また、最適な途中階層の施設数は、階層数の増加に伴い、施設数の対数軸に対して直線の関係を保つように増加する。
- 日本・世界各国での小包輸送の施設数を用いて、最適輸送システムとの比較を行った。現

実の輸送費用より規模の経済性パラメータの推計を行い、各国ともに輸送費用に規模の経済性があることを確認した。そして、最適な階層数は二次元 SS 型では各国ともに 3 階層程度、二次元 MS 型では日本を除いて階層輸送をしない直送となった。現実の 2 階層輸送はその中間であることから、物流システムの構築には輸送費用以外の要因も影響することが推測される。

6.2 今後の課題と展望

本研究では、交通網に関する形態や移動に関する基礎的なモデルを構築したが、交通網形態や交通需要、領域形状、経路選択に強い仮定を置いており、現実的な都市交通へ応用するに当たっては下記のような課題が残されている。そして、地図データ取得基準や近接性と最適性の関係などの今後の発展の可能性の例を以下に述べる。

- 交通網形態の一般化：各モデルは領域内に一様に点と線があることを仮定していた。第 2 章において、あらかじめ点が与えられた場合に、その点間を交通網で結ぶモデルを構築した。しかし、街道沿いの宿場町のように、交通路の途中に新たな集落が形成されることもある。また、交通網の発展によって利便性が向上するのに伴い、都市の階層構造が形成されることもある。よって、人口などの規模の違いにより、点ごとに近接グラフの種類を変更することによって、形成されるグラフ形態の違いを考察する。

同じく第 2 章において、点分布がランダムである場合を考えたが、集塊や分散など異なる点分布での移動利便性の違いについて考察する。第 4 章では、領域内でのネットワークの配置方法（間隔、延長など）を可変とすることで、道路網の密度の違いによる混雑現象を考慮できる。

- 交通需要の一般化：第 2 章と 4 章、第 5 章において、一様な交通需要を仮定したが、距離減衰など一様でない場合や、中心への集中などとも比較する必要がある。

さらに第 5 章では、一箇所から多箇所へ向かう one-to-many demand（工場 消費者）だけではなく、第 2 章のように多箇所から多箇所へ向かう many-to-many demand（利用者 利用者）と比較する必要がある。

- 経路選択の一般化：第 4 章では、必ずノードを経由し、ゾーン間はネットワークを利用して移動をすることを仮定している。しかし、ゾーン内や隣接したゾーンへの移動において、ネットワークを利用しない方が近い場合もある。

第 5 章では、集配経路が全ての階層で等しいことについては、集配経路が直行型と巡回型によって、輸送階層数の上限と下限を押さえることができた。しかし、現実の輸送

第6章 おわりに

では、国土レベルの階層の高い輸送においては直行移動が見られるが、個人宅を中心とした階層の低い輸送においては巡回移動が多く見られる。これより、直行型と巡回型の中間である集配経路を設定し、階層によって集配経路が異なるモデルを構築する必要がある。

- 領域形状の一般化：第2章と第4章、第5章において、領域形状を矩形領域などの幾何学的な形状に限定した。そこで、実際の都市における境界線のような複雑な領域形状での検証も望まれる。

第3章において、地図の境界の影響についての考察を行う必要がある。日本の場合、国土基本図の図葉によって分断されており、外周の図郭交点を含んだ道路点で近接グラフを構築している。一方、米国の場合は、統計区単位によって分断されており、外周の境界線交点を含んだ道路点でグラフを構築している。同じ面積であっても対象地区の形状により境界線の延長による、交差点以外の道路点の数の変化について検討が必要である。

- 地図データ取得基準：第3章において、地図データの縮尺の違いによる影響が挙げられる。今回の分析では、日本は1:2500、米国は1:24000 というように異なる縮尺のデータを用いたため、日米での地図データの取得基準（例えば、どのくらい幅員の道路をデータとして取得するか）の基準）が異なる。幹線道路は主に幅員の広い道路が多く、幅員の狭い道路が減ることによって、幹線道路の占める割合が高くなると考えられる。今後は、こうしたデータ取得基準との関係をふまえたグラフ構成方法及び地区間比較の方法の確立が必要である。
- 近接性と最適性の関係：第2章において、近接グラフにおいて所与の移動需要についての最短経路数え上げ問題を定式化することで、移動距離算出の数値実験を行った。それに対して、交通網の総延長（建設費用）に制約がある条件で、所与の移動需要についての総移動距離（輸送費用）最小化となる交通網を構築することで、近接性によるネットワークとの利便性の違いを考察する必要がある。

第3章において、近接性により区画道路のような比較的階層の低い道路網の形態解析に有用であることが分かった。一方、幹線道路については、通過交通の処理も目的としており、必ずしも近接性だけで説明できない。都市間など広域交通にも対応した交通計画により整備されているため、その上位計画との対応についても考慮したモデル化が必要である。

参考文献

- [Aldaihanim,Quadrifoglio,et al.(2004)] Aldaihanim, M. M., Quadrifoglio, L., Dessouky, M. M., and Hall, R.: Network design for a grid hybrid transit service, *Transportation Research A*, 38, 511–530, 2004.
- [Avram,Bertsimas(1992)] Avram, R. and Bertsimas, D.: The minimum spanning tree constraint in geometrical probability and under the independent model: a unified approach, *The Annals of Applied Probability*, 2, 113–130, 1992.
- [Beardwood,Halton,Hammersley(1959)] Beardwood, J., Halton, J. H., and Hammersley, J. M.: The shortest path through many points, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 55, 299–327, 1959.
- [Campbell(1990)] Campbell, J. F.: Freight consolidation and routing with transportation economies of scale, *Transportation Research B*, 24B (5), 345–361, 1990.
- [Campbell(1993)] Campbell, J. F.: One-to-Many distribution with transshipments: An Analytic Model, *Transportation Science*, 27 (4), 330–340, 1993.
- [Christaller(1933)] Christaller, W.: *Die zentralen Orte in Süddeutschland*, Gustav Fische, 1933.
- [Church,Eaton(1987)] Church, R. L. and Eaton, D. J.: Hierarchical location analysis using covering objectives In Ghosh, A. and Rushton, G., editors, *Spatial analysis and location-allocation models*, 163–185, Van Nostrand Reinhold Company, 1987.
- [Clark,Evans(1954)] Clark, P. J. and Evans, F. C.: Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in population, *Ecology*, 35, 445–453, 1954.
- [Clark,Evans(1955)] Clark, P. J. and Evans, F. C.: On some aspects of spatial pattern in biological populations, *Science*, 121, 397–398, 1955.
- [Collins(1968)] Collins, R.: A geometrical sum rule for two-dimensional fluid correlation functions, *Journal of Physics C*, 2 (1), 1461–1471, 1968.

参考文献

- [Crainic,Laporte(1997)] Crainic, T. G. and Laporte, G.: Planning models for freight transportation, *European Journal of Operational Research*, 97, 409–438, 1997.
- [Daganzo(1999)] Daganzo, C. F.: *Logistics Systems Analysis*, Springer, 1999.
- [Daskin(1985)] Daskin, M. S.: Logistics: An overview of the state of the art and perspectives on future research, *Transportation Research B*, 19B (5/6), 383–398, 1985.
- [Daskin(1995)] Daskin, M. S.: *Network and Discrete Location: Models, Algorithms and Applications*, Wiley, 1995.
- [Delaunay(1928)] Delaunay, B.: Sur la sphère vide, *Proceedings of the International Mathematical Congress held in Toronto*, 695–700, 1928.
- [Dökmeci(1973)] Dökmeci, V. F.: An Optimization Model for a Hierarchical Spatial System, *Journal of Regional Science*, 13 (3), 439–451, 1973.
- [Eilon,Watson-Gandy,Christfides(1971)] Eilon, S., Watson-Gandy, C. D. T., and Christfides, N.: *Distribution management: Mathematical modelling and practical analysis*, Griffin, 1971.
- [Fairthorne(1963)] Fairthorne, D.: The distances between pairs of points in towns of simple geometrical shapes, *Proceedings of the Second International Symposium on the Theory of Road Traffic Flow*, 391–406, 1963.
- [Gabriel,Sokal(1969)] Gabriel, K. R. and Sokal, R. R.: A new statistical approach to geographic variation analysis, *Systematic Zoology*, 18, 259–278, 1969.
- [Ghosh(1951)] Ghosh, B.: Random distances within a rectangle and between two rectangles, *Bulletin of the Calcutta Mathematical Society*, 43, 17–24, 1951.
- [Hagget(1967)] Hagget, P.: An extension of the horton combinatorial model to regional highway networks, *Journal of Regional Science*, 7 (2), 281–290, 1967.
- [Hall(1984)] Hall, R. W.: Travel Distance Through Transportation Terminals on a Rectangular Grid, *Journal of Operations Research Society*, 35 (12), 1067–1078, 1984.
- [Higginson(1993)] Higginson, J. K.: Modeling shipper costs in physical distribution analysis, *Transportation Research A*, 27A (2), 113–124, 1993.
- [Holroyd(1966)] Holroyd, E. M.: *Theoretical average journey lengths in circular towns with various routing systems*, Vol. 43 of *RRL Report* Road Research Laboratory, 1966.

- [Horton(1945)] Horton, R. E.: Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins; Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology, *Bulletin of the Geological Society of America*, 56, 275–370, 1945.
- [Kijmanawat,Ieda(2004)] Kijmanawat, K. and Ieda, H.: Multilevel hierarchical network design: Formulation and development of M-GATS algorithm, *Journal of Infrastructure Planning and Management*, 751, 139–150, 2004.
- [Klose,Drexl(2005)] Klose, A. and Drexl, A.: Facility location models for distribution system design, *European Journal of Operational Research*, 162, 4–29, 2005.
- [Kruskal(1956)] Kruskal, J. B. Jr.: On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem, *Proceeding of American Mathematics Society*, 7, 48–50, 1956.
- [Langevin,Mbaraga,Campbell(1996)] Langevin, A., Mbaraga, P., and Campbell, J. F.: Continuous approximation models in freight distribution: An overview, *Transportation Research A*, 30A (3), 163–188, 1996.
- [Larson,Odoni(1981)] Larson, R. C. and Odoni, A. R.: *Urban Operations Research*, Prentice-Hall, 1981.
- [Lösch(1940)] Lösch, A.: *Die räumliche Ordnung der Wirtschaft*, Gustav Fische, 1940.
- [Miles(1970)] Miles, R. E.: On the homogeneous planar poisson point process, *Mathematical Biosciences*, 6, 85–127, 1970.
- [Möller(1994)] Möller, J.: *Lectures on Random Voronoi Tessellations*, Springer-Verlag, 1994.
- [Narula(1984)] Narula, S. C.: Hierarchical location-allocation problems: A classification scheme, *European Journal of Operational Research*, 15, 93–99, 1984.
- [Okabe,Boots,et al.(2000)] Okabe, A., Boots, B., Sugihara, K., and Chiu, S. N.: *Spatial Tessellations*, John Wiley and Sons, 2000.
- [Pickard(1982)] Pickard, D. K.: Isolated nearest neighbors, *Journal of Applied Probability*, 19, 444–449, 1982.
- [Prim(1957)] Prim, R. C.: Shortest connection networks and some generalizations, *Bell System Technical Journal*, 36, 1389–1401, 1957.

参考文献

- [Robert(1968)] Robert, F. D. K.: Random minimal trees, *Biometrika*, 55, 255–258, 1968.
- [Shreve(1966)] Shreve, R. L.: Statistical Law of Stream Numbers, *Journal of Geology*, 75, 178–186, 1966.
- [Stephan(1988)] Stephan, G. E.: The Distribution of Service Establishments, *Journal of Regional Science*, 28 (1), 29–40, 1988.
- [Taaffe,Gauthier,O’Kelly(1996)] Taaffe, E. J., Gauthier, H. L., and O’Kelly, M. E.: *Geography of Transportation*, Prentice Hall., 1996.
- [Toussaint(1980)] Toussaint, G. T.: The relative neighbourhood graph of a finite planar set, *Pattern Recognition*, 12, 261–268, 1980.
- [Vaughan(1987)] Vaughan, R. J.: *Urban Spatial Traffic Patterns*, Pion Limited, 1987.
- [Watanabe,Suzuki(2003)] Watanabe, D. and Suzuki, T.: An Optimal Hierarchical Logistics System Using Continuous Approximations, *The International Workshop on Urban Operations Research*, 30–31, 2003.
- [浅野, 桐越 (1983)] 浅野光行, 桐越信: 都市における道路網の整備水準評価, 建築研究資料, No43. 建設省建築研究所, 1983.
- [浅見, 神谷, 島津 (1999)] 浅見泰司, 神谷浩史, 島津利行: 都市道路網の知覚的類似度, 総合都市研究, 69, 187–199, 1999.
- [有井, 腰塚 (1997)] 有井良仁, 腰塚武志: 移動時間短縮効果の算出に関する場合分けアルゴリズム, 都市計画論文集, 32, 151–156, 1997.
- [家田, 佐野, 常山 (1992)] 家田仁, 佐野可寸志, 常山修治: マクロ集配輸送計画モデルの構築とその「地区型共同集配送」評価への適用, 土木計画学研究・論文集, 10, 247–254, 1992.
- [家田 (1997)] 家田仁: Hub-Spokes/Point-to-Point や集約型 / 直行型輸送など階層的輸送システムの均質無限平面上における定式化と解法, 土木計画学研究・論文集, 14, 773–782, 1997.
- [石黒, 桜田, 稲村 (2000)] 石黒一彦, 桜田崇治, 稲村肇: 規模の経済を考慮した輸送費用最小化に基づく広域物流拠点配置モデルの開発, 土木計画学研究・論文集, 17, 693–700, 2000.
- [石水, 奥野 (1973)] 石水照雄, 奥野隆史: 計量地理学, 共立出版, 1973.
- [岩間, 佐藤, 田中 (1998)] 岩間司, 佐藤政則, 田中佳章: 日本と海外の郵便ネットワーク, 郵政研究所 10 周年記念論文集, 221–252, 1998.

- [大津, 腰塚 (1997)] 大津晶, 腰塚武志: 都市域の交通流集中に関する数理的解析, 都市計画論文集, 32, 133-138, 1997.
- [大津, 腰塚 (1998)] 大津晶, 腰塚武志: 都市内流動量分布に関する基礎的研究, 都市計画論文集, 33, 319-324, 1998.
- [岡田, 田中 (1987)] 岡田憲夫, 田中成尚: 形態特性からみた道路網整備度の計量指標化に関する研究, 土木計画学研究・論文集, 5, 195-202, 1987.
- [岡田, 田中 (1988)] 岡田憲夫, 田中成尚: ネットワーク特性を考慮した道路機能水準の計量指標化に関する研究, 土木学会論文集, 389, 65-74, 1988.
- [岡部, 奥貫 (1993)] 岡部篤行, 奥貫圭一: 空間的階層の分析と最適化, *Proceedings of the Fifth RAMP symposium*, 127-140, 1993.
- [奥平 (1976)] 奥平耕造: 都市工学読本, 彰国社, 1976.
- [奥貫, 岡部 (1995)] 奥貫圭一, 岡部篤行: 包含階層構造を持つ施設システムの最適化, 都市計画論文集, 30, 565-570, 1995.
- [小倉 (1999)] 小倉昌男: 小倉昌男経営学, 日経 BP 社, 1999.
- [小場瀬 (1989)] 小場瀬令二: 住区内街路の形態, 住区内街路研究会, 人と車「おりあい」の道づくり - 住区内街路計画考, 52-63, 鹿島出版会., 1989.
- [笠原, 古山 (1998)] 笠原一人, 古山正雄: 最短木および階層を有する木の長さに関する考察, 日本建築学会計画系論文集, 504, 155-161, 1998.
- [加藤, 小川, 河田 (1999)] 加藤径子, 小川英明, 河田克博: 道路網からみたスペイン都市の特性に関する研究, 都市計画論文集, 34, 529-534, 1999.
- [木村, 清水 (1987)] 木村一裕, 清水浩志郎: 都市を連携する道路ネットワークの評価方法について, 都市計画論文集, 22, 493-498, 1987.
- [木山, 古山 (2004)] 木山剛志, 古山正雄: 都市エントロピー係数を用いた都市形態解析手法パリの歴史的変遷の考察を事例として, 都市計画論文集, 39 (3), 823-828, 2004.
- [木山, 古山 (2005)] 木山剛志, 古山正雄: スペース・シンタックスを用いた「京都の近代化」に見られる空間的志向性の分析 京都都市計画道路新設拡築事業における理念の考察, 都市計画論文集, 40 (3), 139-144, 2005.

参考文献

- [久保, 田村, 松井 (2002)] 久保幹雄, 田村明久, 松井知己編: 応用数理計画ハンドブック, 朝倉書店, 2002.
- [栗田 (1997)] 栗田治: 任意の領域の道路延長を推定する公式 - Thickness 函数を用いた腰塚の推定公式の一般化 -, 都市計画論文集, 32, 145-150, 1997.
- [栗田 (1999)] 栗田治: 都市施設の適切な数に関する数理モデル - 政令指定都市の区数に関する分析例 -, 日本建築学会計画系論文集, 524, 169-176, 1999.
- [栗田 (2000)] 栗田治: 東京道路網に関する道路距離と理論的距離, 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, 64-65, 2000.
- [栗田 (2001)] 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, 859-864, 2001.
- [栗田 (2004)] 栗田治: 都市モデル読本, 共立出版, 2004.
- [国土交通省 (2002)] 国土交通省: 物流サービスに係る内外価格差調査報告書, 国土交通省, 2002.
- [国土交通省 (2004)] 国土交通省総合政策局情報管理部監修: 陸運統計要覧 (平成 16 年版), 国土交通省, 2004.
- [腰塚 (1978a)] 腰塚武志: 地域内距離, *Journal of Operations Research Society of Japan*, 21, 302-319, 1978.
- [腰塚 (1978b)] 腰塚武志: 道路網と交差点, 都市計画, 103, 36-41, 1978.
- [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, 43-48, 1983.
- [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, 43-48, 1985.
- [腰塚 (1986)] 腰塚武志: 都市平面における距離の分布, 谷村秀彦他, 都市計画数理, 1-55, 朝倉書店, 1986.
- [腰塚, 今井 (1991)] 腰塚武志, 今井和敏: 平均走行速度と信号密度, 都市計画論文集, 26, 547-552, 1991.
- [腰塚 (1992)] 腰塚武志: 都市域の流動に関する理論的考察, 都市計画論文集, 27, 343-348, 1992.

- [腰塚 (1994)] 腰塚武志: 走行時間や走行エネルギーを最小にする道路密度, 都市計画論文集, 29, 319–324, 1994.
- [腰塚 (1996)] 腰塚武志: 建物内の移動距離からみた低層建物と高層建物との比較, 都市計画論文集, 31, 31–36, 1996.
- [腰塚 (1999)] 腰塚武志: 移動からみた放射状と格子状交通網の比較, 都市計画論文集, 34, 763–768, 1999.
- [小林 (1983)] 小林純一: 道路距離と直線距離, 筑波大学大学院環境科学研究科修士論文., 1983.
- [斉藤 (1971)] 斉藤功: 東京集乳圏における酪農地域の空間構造, 地理学評論, 44, 271–283, 1971.
- [斉藤 (1989)] 斉藤功: 東京集乳圏: その拡大・空間構造・諸相, 古今書院, 1989.
- [貞広, 岡部 (1994)] 貞広幸雄, 岡部篤行: 都市施設の空間階層構造を記述するための一手法, 地理学評論, 67A (4), 225–235, 1994.
- [杉浦 (1989)] 杉浦芳夫: 立地と空間的行動 (地理学講座 5), 古今書院, 1989.
- [鈴木 (1990)] 鈴木勉: 施設の最適な階層構造に関する研究, 都市計画論文集, 25, 331–336, 1990.
- [鈴木, 川口 (1998)] 鈴木勉, 川口明子: 線分都市内での輸送における規模の経済性と最適地域単位, 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, 24–25, 1998.
- [鈴木 (1999a)] 鈴木勉: p -メディアン問題における規模密度法則の成立性, 日本建築学会計画系論文集, 532, 171–176, 1999.
- [鈴木 (1999b)] 鈴木勉: 移動損失基準による地域施設密度と人口密度の理論的關係に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 521, 183–187, 1999.
- [鈴木, 腰塚 (2004)] 鈴木勉, 腰塚武志: 交通路の存在する都市空間における距離・時間分布, 日本応用数理学会論文誌, 14 (2), 99–116, 2004.
- [田口, 大山 (1993)] 田口東, 大山達雄: ネットワーク構造に基づく道路の重要性評価 - 都市内道路網への適用例 -, オペレーションズ・リサーチ, 38 (9), 56–61, 1993.
- [田中 (2005)] 田中健一: 直線距離との比の分布から見たマンハッタン距離の性質, 第 59 回形の科学シンポジウム予稿, 20, 124–125, 2005.

参考文献

- [谷村, 古山 (2001)] 谷村仰仕, 古山正雄: 都市街路網パターンの再現率に関する一考察 - 英国歴史都市を事例として -, 都市計画論文集, 36, 961-966, 2001.
- [谷村, 古山 (2003)] 谷村仰仕, 古山正雄: 英国歴史都市の街路網に見られる合理的形態則に関する考察, 都市計画論文集, 563, 179-186, 2003.
- [田村, 腰塚, 大澤 (2001)] 田村一軌, 腰塚武志, 大澤義明: 交通網上の道路距離と直線距離, 都市計画論文集, 36, 877-882, 2001.
- [田村, 腰塚, 大澤 (2003)] 田村一軌, 腰塚武志, 大澤義明: 移動効率および通過量に着目した一方通行規制の評価, 都市計画論文集, 38 (3), 145-150, 2003.
- [外井, 吉武 (1992)] 外井哲志, 吉武哲信: 点間平均距離を用いた都市内道路網の形態評価, 都市計画論文集, 27, 271-276, 1992.
- [東海林, 貞広 (1998)] 東海林洋介, 貞広幸雄: 道路網に基づいた地区分類法, 地理情報システム学会講演論文集, 7, 285-288, 1998.
- [徳永 (1966)] 徳永英二: 豊平川の排水網構成と Horton の第一法則の検討, 北地球物理研究報告, 15, 1-66, 1966.
- [徳永, 岡田, 須田 (1995)] 徳永幸之, 岡田龍二, 須田熙: 宅配輸送におけるセンター配置及び輸送経路決定モデル, 土木計画学研究・論文集, 12, 519-524, 1995.
- [都市計画道路計画標準策定委員会 (1974)] 都市計画道路計画標準策定委員会: 都市計画道路の計画標準, 1974.
- [都市デザイン研究体 (1968)] 都市デザイン研究体: 日本の都市空間, 彰国社, 1968.
- [都市問題研究会 (1981)] 都市問題研究会: 明日の都市と道路整備 - その展望と施策 -, 都市計画協会, 1981.
- [土井, 川上, 他 (1981)] 土井幸平, 川上秀光, 森村道美, 松本敏行: 都市計画 (新建築学体系 16), 1981.
- [土木学会 (1998)] 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析-最新の理論と解法, 社団法人土木学会, 1998.
- [中村, 林, 宮本 (2004)] 中村英夫, 林良嗣, 宮本和明: 都市交通と環境 - 課題と政策 -, 運輸政策研究機構, 2004.

- [西野 (1994)] 西野嘉彦: 都市域の流動と集中について, 筑波大学第三学群社会工学類卒業論文, 1994.
- [日本ロジスティクス協会 (2005)] 日本ロジスティクス協会: 2004 年度物流コスト調査報告書, 社団法人日本ロジスティクス協会, 2005.
- [野田 (1995)] 野田洋: 街路網の形態的特性に基づく定量的地利値の導入とその基礎的考察, 日本建築学会計画系論文集, 470, 139-148, 1995.
- [野田 (1996)] 野田洋: メッシュ・データを用いた街路網の形態的特性に関する定量的分析, 都市計画, 202, 64-72, 1996.
- [野田 (1999)] 野田洋: 定量的地利尺度を用いた都市街路網の分析的研究, 日本建築学会計画系論文集, 519, 171-178, 1999.
- [早川, 大野 (2005)] 早川紀朱, 大野秀敏: ツリー構造の抽出による街路パターンの手続き的分析, 日本建築学会計画系論文集, 591, 239-245, 2005.
- [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), 421-426, 2003.
- [藤田, 鈴木 (2004)] 藤田学洋, 鈴木勉: 放射環状型高速交通網の最適パターンと交通手段別分担率との関係に関する研究, 都市計画論文集, 39 (3), 835-840, 2004.
- [古山 (1977)] 古山正雄: 都市の形について, オペレーションズ・リサーチ, 22 (1), 20-25, 1977.
- [古山 (1985)] 古山正雄: 都市における汎用的ネットワークとそのミニマムスパンニングツリーの長さの推定, 都市計画論文集, 20, 97-102, 1985.
- [古山 (1988a)] 古山正雄: 地域間ネットワークの評価指標 U の値について, 都市計画論文集, 23, 25-30, 1988.
- [古山 (1988b)] 古山正雄: 地域結合パターンとその評価指標に関する考察, 日本建築学会計画系論文報告集, 392, 84-92, 1988.
- [古山 (1988c)] 古山正雄: 地域結合関係における木構造, 日本建築学会計画系論文報告集, 384, 63-70, 1988.
- [古山 (2002)] 古山正雄: 造形数理, 共立出版, 2002.
- [古山 (2003)] 古山正雄: 地域間ネットワークにおける最短結合と近隣結合に関する理論的考察, 都市計画論文集, 38, 379-384, 2003.

参考文献

- [古山 (2005)] 古山正雄: 地域間ネットワークにおける近隣木の長さについて, 都市計画論文集, 40 (3), 157-162, 2005.
- [増田, 今野 (2005)] 増田直紀, 今野紀雄: 複雑ネットワークの科学, 産業図書, 2005.
- [榊谷, 田村, 斉藤 (1993)] 榊谷有三, 田村亨, 斉藤和夫: 道路容量からみた道路網形態と土地利用パターンの整合性について, 都市計画論文集, 28, 337-342, 1993.
- [榊谷, 田村, 斉藤 (1995)] 榊谷有三, 田村亨, 斉藤和夫: 梯子型道路網形態を対象とした道路網容量増強に関する研究, 都市計画論文集, 30, 613-618, 1995.
- [松島, 栗田 (2003)] 松島裕久, 栗田治: 東京道路網に関する距離モデルの実証分析, 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, 166-167, 2003.
- [松本 (1990)] 松本昌二: 都市内物流に関するロジスティクス費用と顧客サービスのトレードオフ, 土木学会論文集, 413, 31-38, 1990.
- [三浦, 腰塚 (1993)] 三浦英俊, 腰塚武志: 2 種類の交通手段を持つ領域の移動時間について, 都市計画論文集, 28, 397-402, 1993.
- [三浦 (1999)] 三浦英俊: 混雑に耐えうる道路の量について, 都市計画論文集, 34, 757-762, 1999.
- [水野, 掛井 (1990a)] 水野節子, 掛井秀一: 都市街路形態のフラクタル解析, 日本建築学会計画系論文報告集, 414, 103-108, 1990.
- [水野, 掛井 (1990b)] 水野節子, 掛井秀一: 都市街路形態の定量化手法 - フラクタル解析及びテクスチャ解析 -, 都市計画論文集, 25, 253-258, 1990.
- [安井, 貞広 (2003)] 安井謙介, 貞広幸雄: 道路網の変化における時空間分析手法, 日本建築学会計画系論文集, 569, 147-153, 2003.
- [山川 (1980)] 山川仁: 新市街地における地区道路の形成と整備水準, 都市計画論文集, 15, 427-432, 1980.
- [渡部, 鈴木, 他 (1999)] 渡部大輔, 鈴木勉, 石田東生, 古屋秀樹: 領域形状が交通ネットワーク必要量に与える影響に関する数理的研究, 都市計画論文集, 34, 769-774, 1999.
- [渡部, 鈴木 (1999)] 渡部大輔, 鈴木勉: 領域形状による同一交通サービス水準のためのネットワーク必要量, 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, 82-83, 1999.

- [渡部, 鈴木 (2000a)] 渡部大輔, 鈴木勉: 一次元都市における最適な集約・分配輸送システムに関する研究, 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, 136–137, 2000.
- [渡部, 鈴木 (2000b)] 渡部大輔, 鈴木勉: 規模の経済性を考慮した階層的収集・配送輸送システムに関する研究, 都市計画論文集, 35, 1027–1032, 2000.
- [渡部 (2002)] 渡部大輔: 収集・配送輸送システムにおける階層構造の最適化に関する研究 (学生論文賞受賞論文要約), オペレーションズ・リサーチ, 35 (1), 48–49, 2002.
- [渡部, 鈴木 (2003)] 渡部大輔, 鈴木勉: 巡回型輸送システムの最適な階層構造に関する研究, 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, 40–41, 2003.
- [渡部, 鈴木, 腰塚 (2004a)] 渡部大輔, 鈴木勉, 腰塚武志: 近接グラフの辺長分布, 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, 332–333, 2004.
- [渡部, 鈴木, 腰塚 (2004b)] 渡部大輔, 鈴木勉, 腰塚武志: 巡回路の辺長分布, 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, 330–331, 2004.
- [渡部 (2005a)] 渡部大輔: 近接グラフを用いた交差点による道路網構築, 形の科学会誌, 20 (2), 212–213, 2005.
- [渡部 (2005b)] 渡部大輔: 近接グラフを用いた道路網形態の解析, 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, 14–15, 2005.
- [渡部 (2005c)] 渡部大輔: 近接グラフ上の移動距離, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季発表会アブストラクト集, 200–201, 2005.
- [渡部 (2005d)] 渡部大輔: 交差点間の近接性に着目した都市内道路網形態の解析, 都市計画論文集, 40 (3), 133–138, 2005.
- [渡部, 阪田 (2005)] 渡部大輔, 阪田知彦: 図郭・行政界で分断された道路ネットワークの自動結合に関する基礎的研究, 都市計画報告集, 38 (4), 114–119, 2005.

謝 辞

このような形で論文をまとめることができたのは、長きにわたり様々な形で周りの方々からご指導やご支援を頂いたおかげです。

卒業研究からご指導して頂いた鈴木勉先生との出会いがなければ、この論文の完成はありませんでした。懇切丁寧なご指導を通じて、研究の楽しさとそれに伴う厳しさを教えて頂きました。先生の研究に対する姿勢は、今後の研究者生活への大きな手本となりました。

腰塚武志先生、大澤義明先生には、大学院入学から長きに渡り、研究に関する有益なコメントとともに、夏ゼミや研究室行事などで折に触れお気遣いを頂きました。また、都市解析に関する研究会を主催され、最先端の研究を幅広く深く触れる貴重な機会を頂きました。

石田東生先生、古屋秀樹先生（現、東洋大学）には、卒業研究において実務で要求される視点からご指導頂きました。岡本直久先生、堤盛人先生には、博士論文をまとめる過程において非常に有益なコメントを頂きました。韓国・漢陽大学校の魯正鉉先生には、客員教授としてご滞在中に、研究内容とともに英語表現についても貴重なアドバイスを頂きました。

都市解析を研究されている先生方からも、学会や研究会などの場を通じてたくさんのアドバイスを頂きました。京都工芸繊維大学の古山正雄先生、中央大学の田口東先生には、折に触れ示唆に富んだコメントを多数頂きました。慶應義塾大学の栗田治先生、首都大学東京の吉川徹先生には、ゼミ合宿で一緒にさせて頂き、研究だけでなく様々な相談についてご助言を頂きました。建築研究所の阪田知彦先生には、研究と政策の関係について勉強させて頂きました。

さらに、都市解析第三世代である他大学の大学院生との交流を通じて、非常に刺激を受けました。鳥海重喜さん、田中健一さんには、国内外の公式・非公式の場で交わした学術的・非学術的な議論を通じて、各自の専門的な視点から新鮮な切り口を提供してくれました。

筑波大学社会工学に学び、都市計画専攻の研究室に在籍して、幸運にも多くの同志と出会えました。先輩の皆様には、若手研究者の身近な手本を示されるとともに、折に触れてアドバイスを頂きました。石井儀光さん、大津晶さん、田村一軌さんには、研究に対する姿勢や作法について厳しくも丁寧なご指導を頂きました。大山崇さん、中川享規さん、渡辺貴史さんには、研究の技術的な面や研究室の運営、日常生活全般まで気軽に相談に乗って頂きました。

そして、共に切磋琢磨しながら学位を目指す仲間にも恵まれたことは、研究での刺激を受けるとともに、精神的な励みとなりました。宮川雅至さん、尾崎尚也さん、阿部英樹さんからは、先に博士論文を仕上げた先輩として、非常に有益なアドバイスを頂きました。そして、小林隆史さんとは、ともに論文審査のステップを歩み、苦しみと喜びを分かち合うことができました。

他にも、山本剛さん、雨宮護さんを始めとして、大学内外の多くの方々からの暖かい支援と励ましに、心から謝意を表します。

最後に、これまで長き渡って暖かく支えてくれた父國男、母陽子に深く感謝します。

2006 年 3 月

付 録 A 都市内道路網に関する地理情報データ

第 3 章で用いた日本と米国における道路網の地図データ作成方法及び作成したデータについてまとめる。

A.1 日本主要都市

A.1.1 道路網データの作成

道路中心線データよりリンク・ノードデータを抽出したものより、交差点ノード間を結ぶ線分をリンクとして定義したものを使用する。こうしたデータの取得に各種の空間データを用いる場合、図郭などの人為的な空間単位によって図形が分断されており、結合・位相構造構築などの加工を施す必要がある。

例えば、数値地図 2500（空間データ基盤）におけるつくばセンター地区の道路網について見てみる。図 A.1 は、(i) では図郭（黄色線）に沿って交差点でないのにリンクの起終点が存在し、青線の道路網がその影響を受けている。道路の位相構造としては、(ii) のようにファイル分割により分断された道路網を結合されているべきである。

これらの問題を回避するためには、あらかじめ図郭などの人為的な境界で分断されたデータ

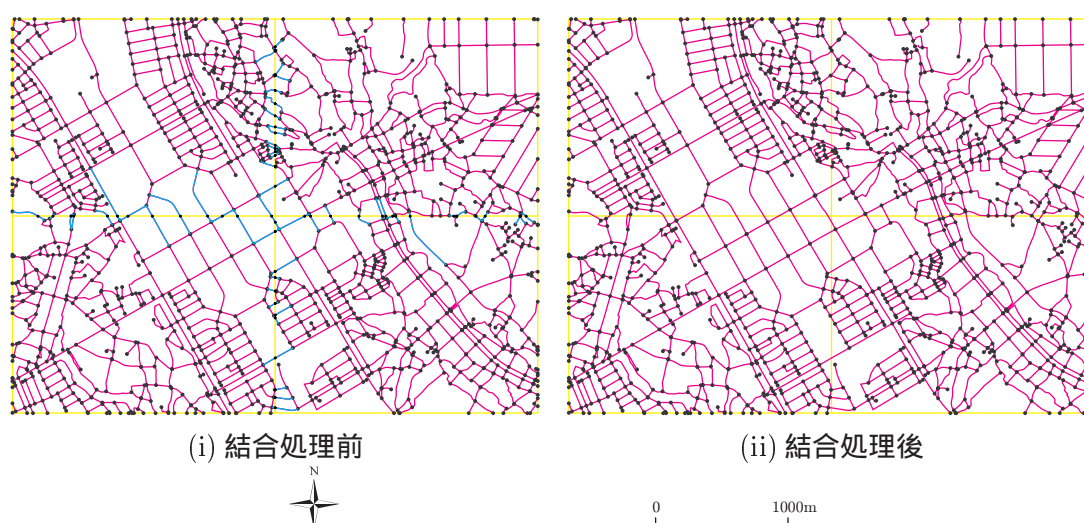


図 A.1: 図郭による道路網分断例（数値地図 2500）

付 録 A 都市内道路網に関する地理情報データ

を幾何学的に結合する処理が必要である．数値地図 2500 では、「図郭・端点タグ」が位置（図郭 4 辺，4 頂点）や座標系境界，連結・非連結の違いによって 36 種類のコードが用意されており，これを用いることにより効率的に結合することが可能である．アルゴリズムの詳細は，[渡部, 阪田 (2005)] で説明している．

第 3 章で用いた日本国内主要都市の道路網の地図データをまとめる．表表 A.1 は用いた各都市の対象とした図葉で，国土基本図の図葉と対応している．

表 A.1: 対象地区の道路網の対象図葉（数値地図 2500）

都市	地区	左上	右上	左下	右下
東京	東京駅	09LD183	09LD184	09LD281	09LD282
	上野	09LD091	09LD092	09LD093	09LD094
	新宿	09LD182	09LD171	09LD164	09LD173
	渋谷	09LD271	09LD272	09LD273	09LD274
	池袋	09KD973	09KD974	09LD071	09LD072
札幌	大通	12NC411	12NC412	12NC413	12NC414
仙台	青葉通	10QE402	10QE411	10QE404	10QE413
さいたま	浦和	09KO454	09KO463	09KO552	09KO561
千葉	千葉駅	09LE461	09LE462	09LE463	09LE464
横浜	関内	09MO051	09MO052	09MO053	09MO054
川崎	川崎駅	09LD762	09LD771	09LD764	09LD773
静岡	駿府城	08ND773	08ND774	08ND871	08ND872
名古屋	栄	07ND034	07ND043	07ND132	07ND141
京都	下京	06ND741	06ND742	06ND743	06ND744
	上京	06OD854	06OD863	06OD952	06OD961
大阪	難波	06OC981	06OC982	06OC983	06OC984
	中之島	06OC881	06OC882	06OC883	06OC884
神戸	三宮	05OF891	05OF892	05OF893	05OF894
広島	平和大通	03PE961	03PE962	03PE963	03PE964
北九州	小倉	02GD762	02GD771	02GD764	02GD773
福岡	天神	02HC861	02HC862	02HC863	02HC864
つくば	センター	09JE663	09JE664	09JE761	09JE762

A.1.2 道路網と構築原理

各都市について，左側に道路網，右側に近接グラフによる各道路辺の構築原理をしめす．

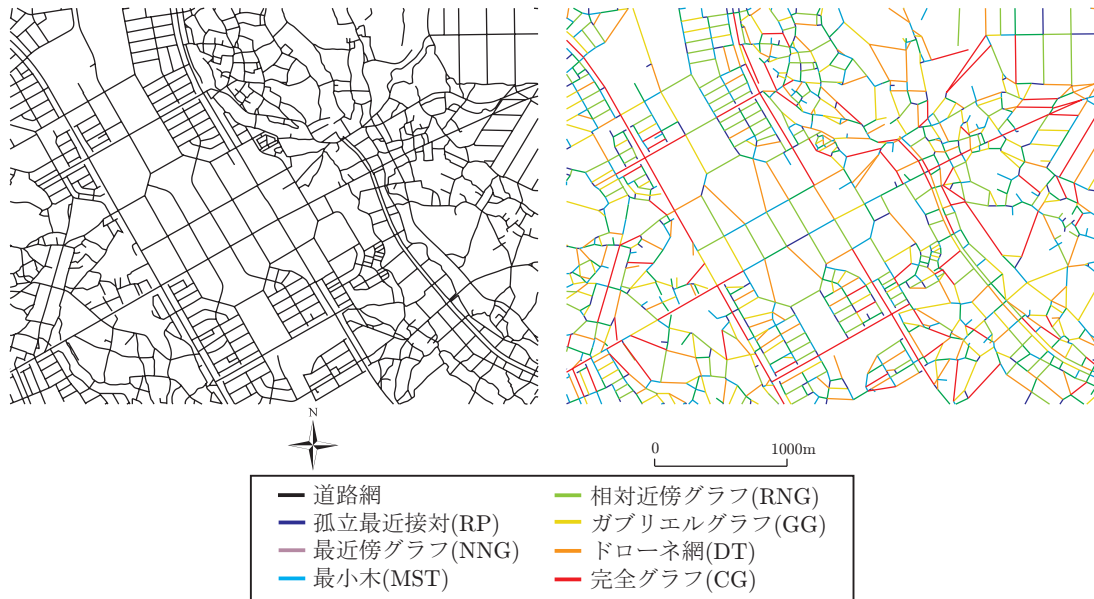


図 A.2: 道路網 (つくばセンター)

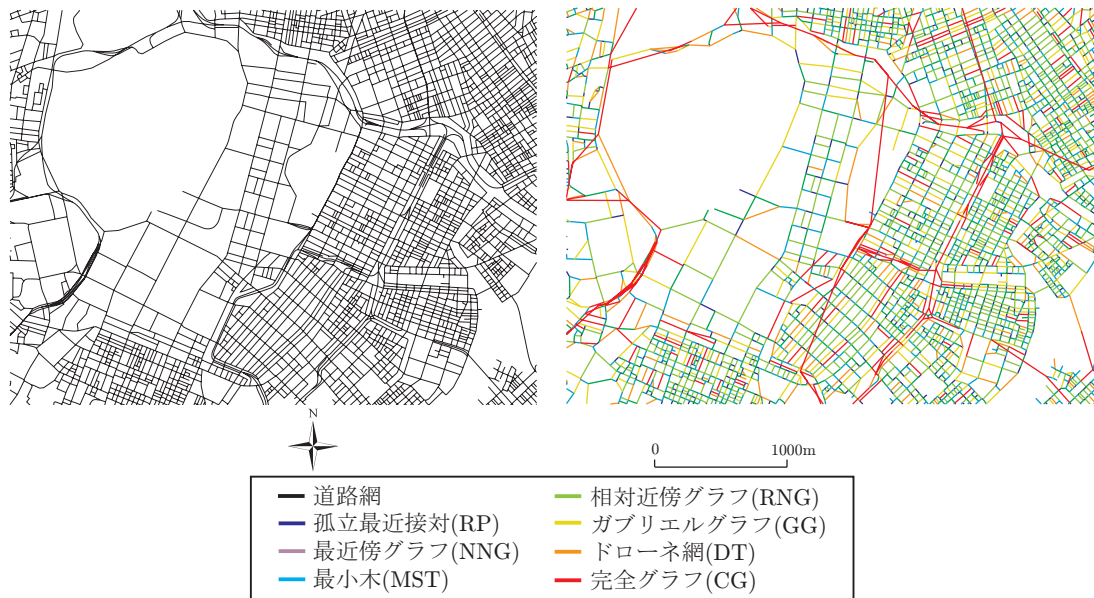


図 A.3: 道路網 (東京・東京駅)

付 録 A 都市内道路網に関する地理情報データ

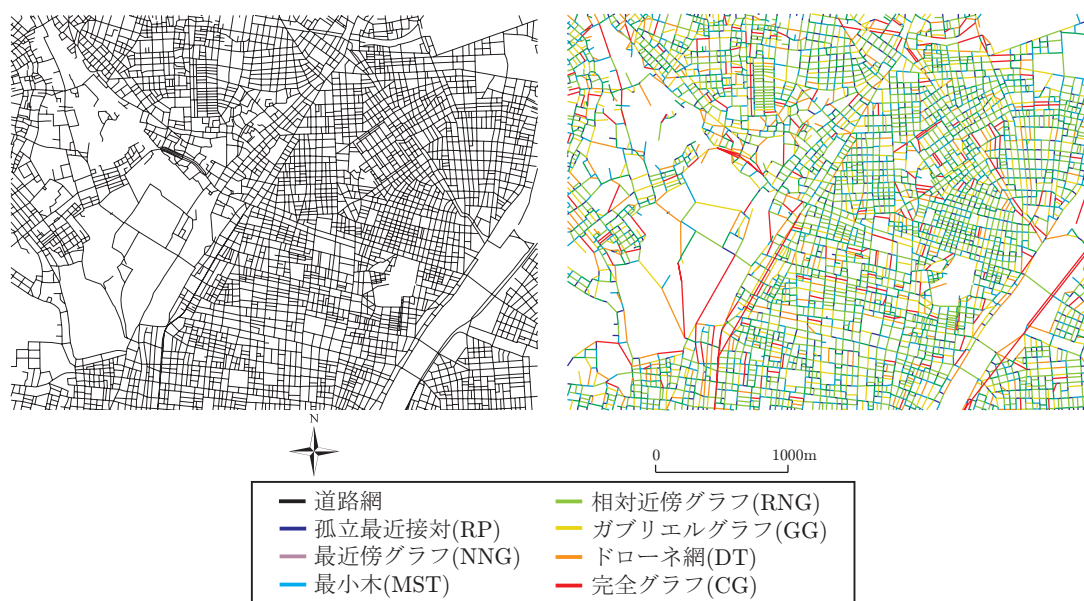


図 A.4: 道路網 (東京・上野駅)

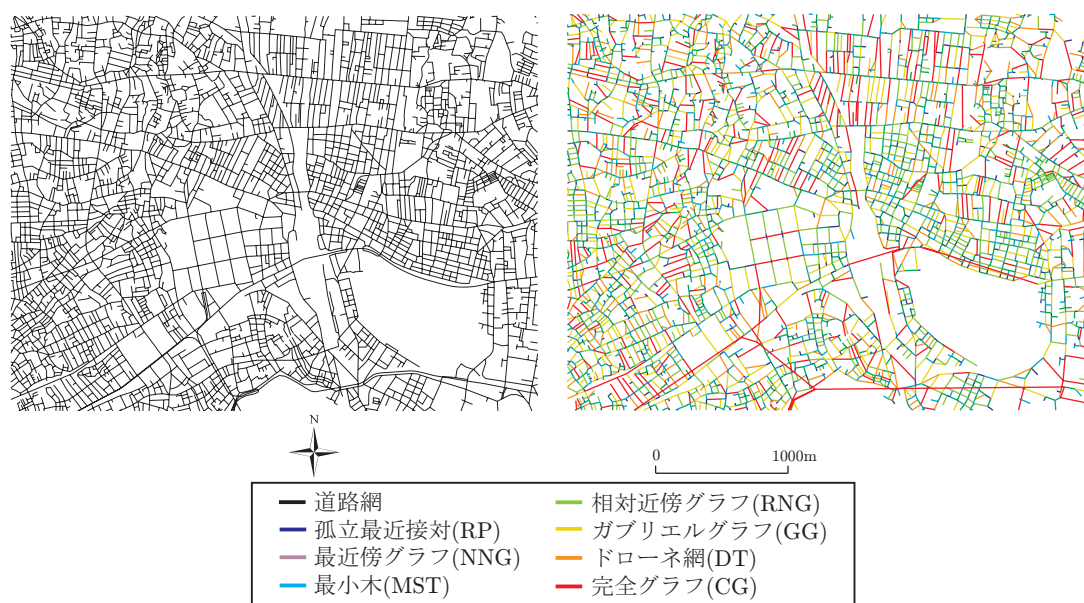


図 A.5: 道路網 (東京・新宿駅)

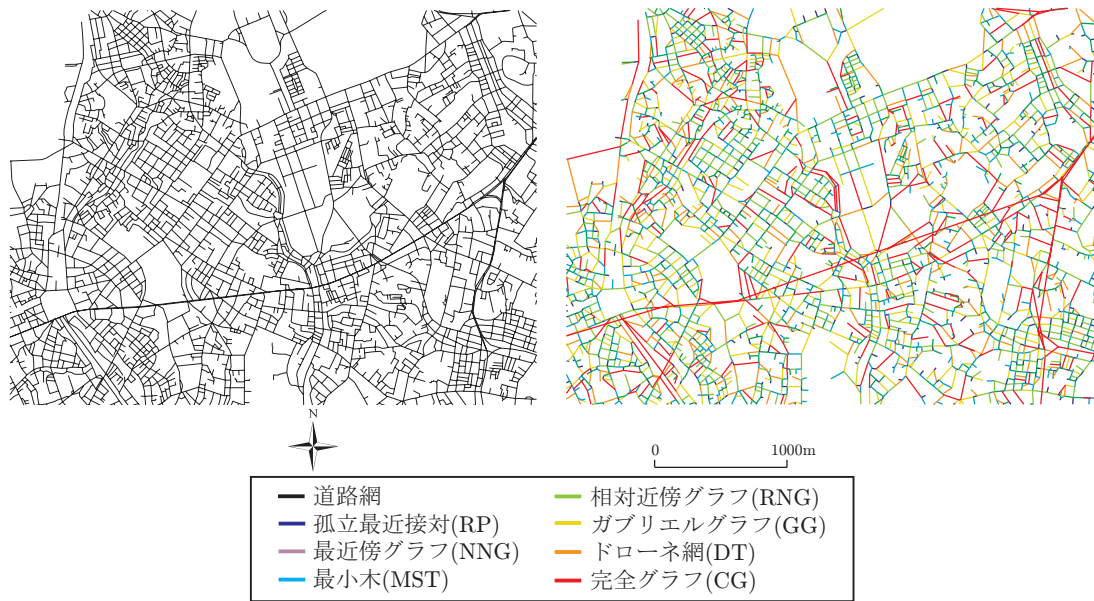


図 A.6: 道路網 (東京・渋谷駅)

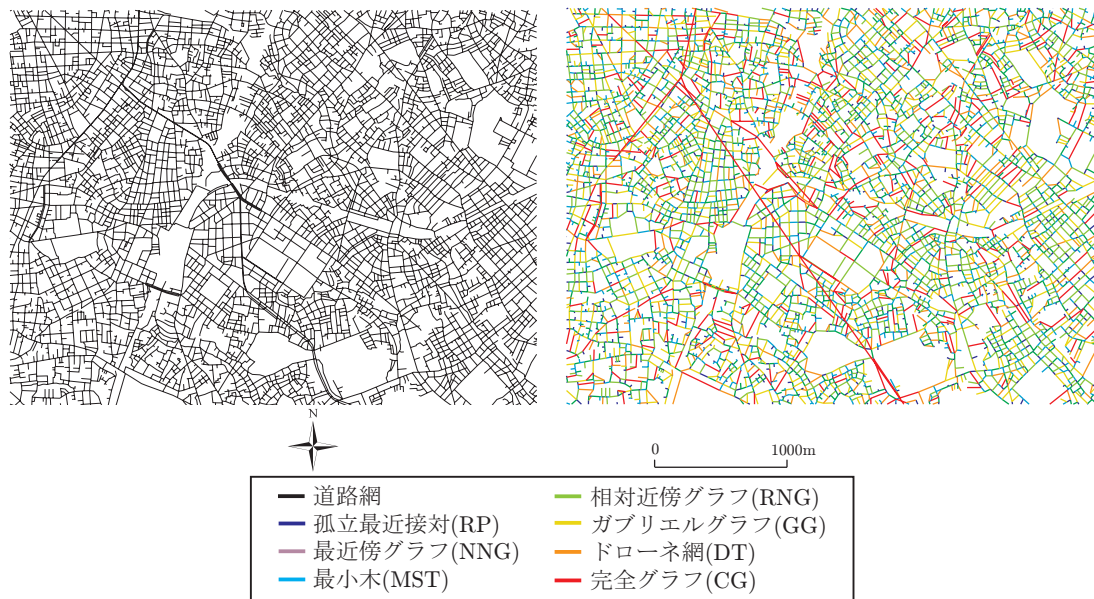


図 A.7: 道路網 (東京・池袋駅)

付 録 A 都市内道路網に関する地理情報データ

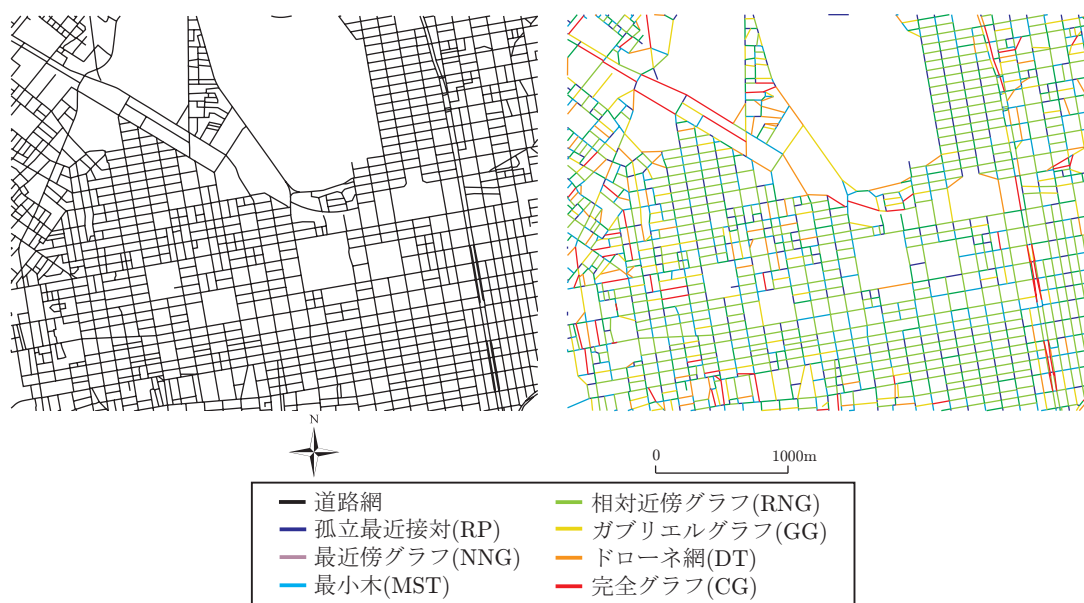


図 A.8: 道路網 (札幌)

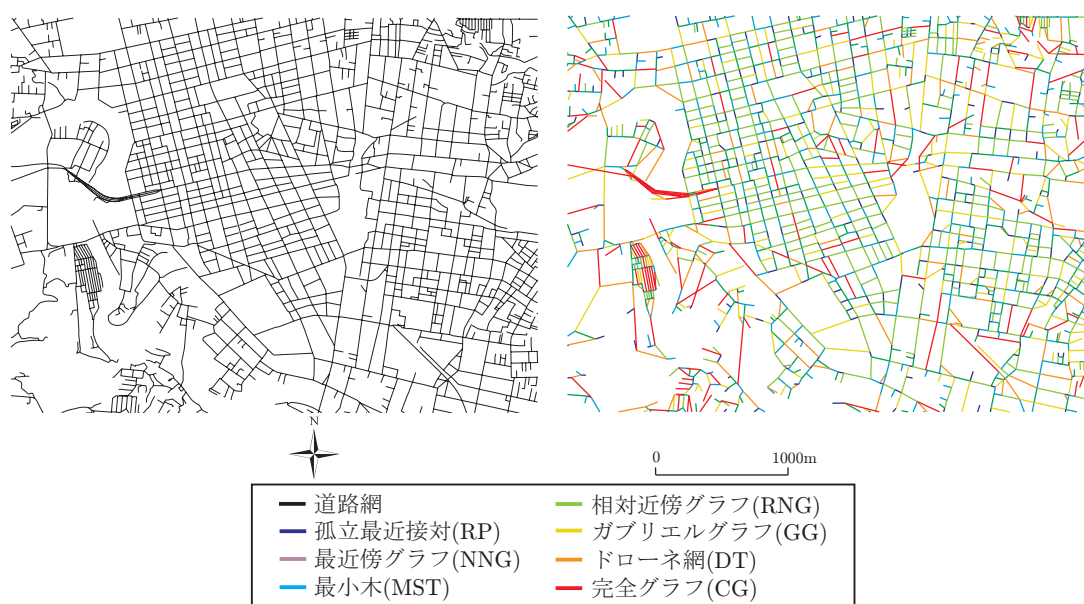


図 A.9: 道路網 (仙台)

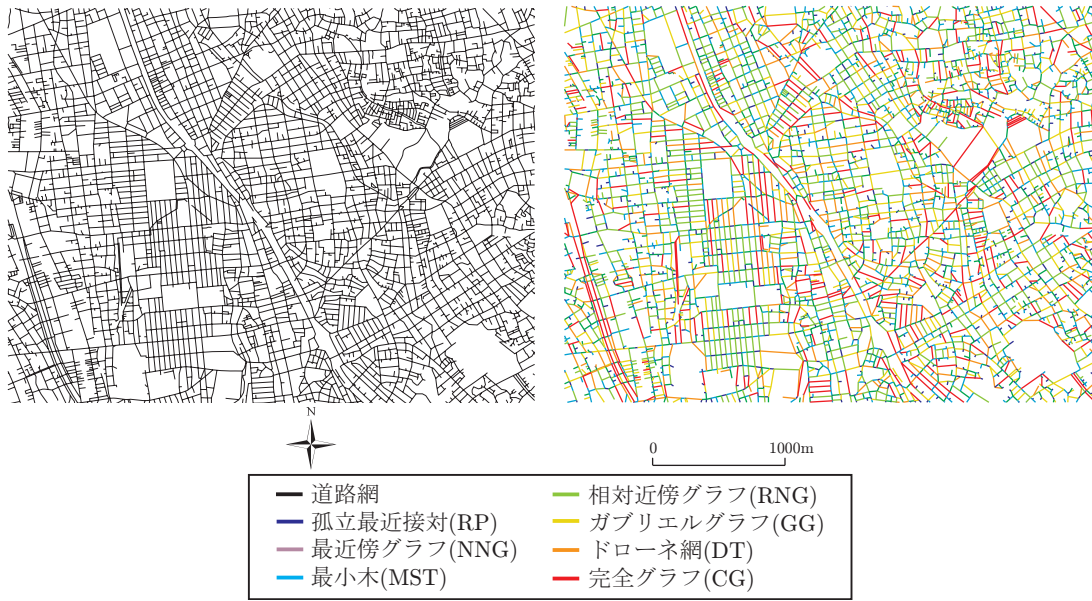


図 A.10: 道路網 (さいたま)

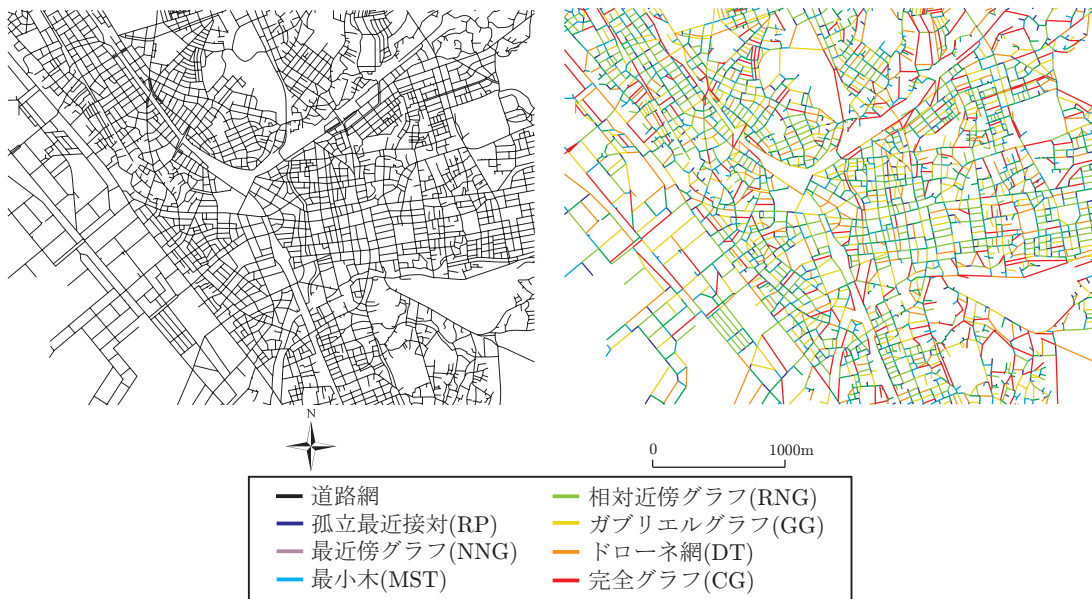


図 A.11: 道路網 (千葉)

付 録 A 都市内道路網に関する地理情報データ

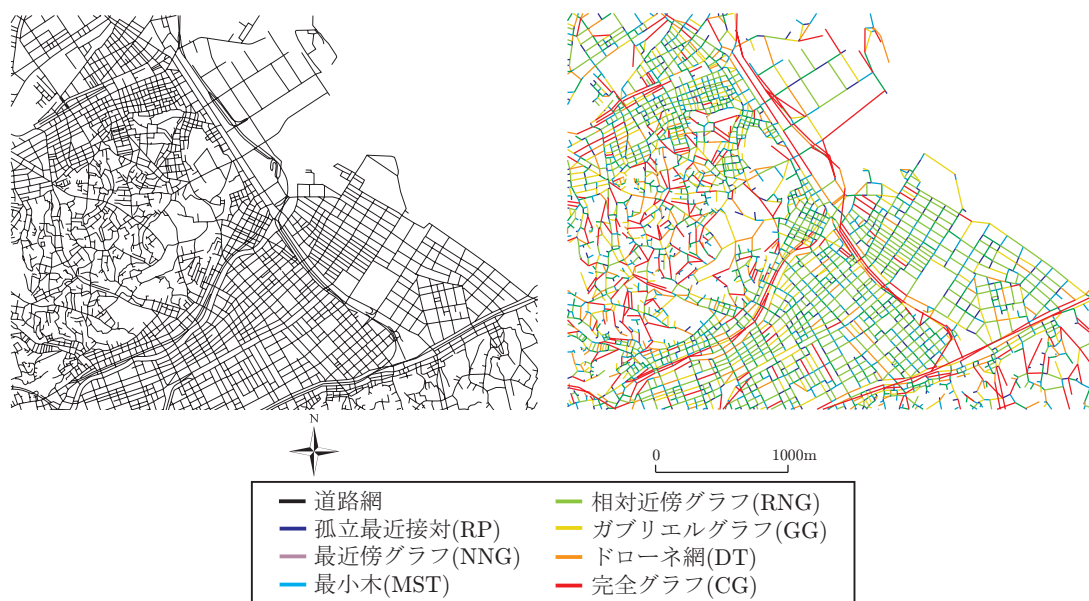


図 A.12: 道路網 (横浜)

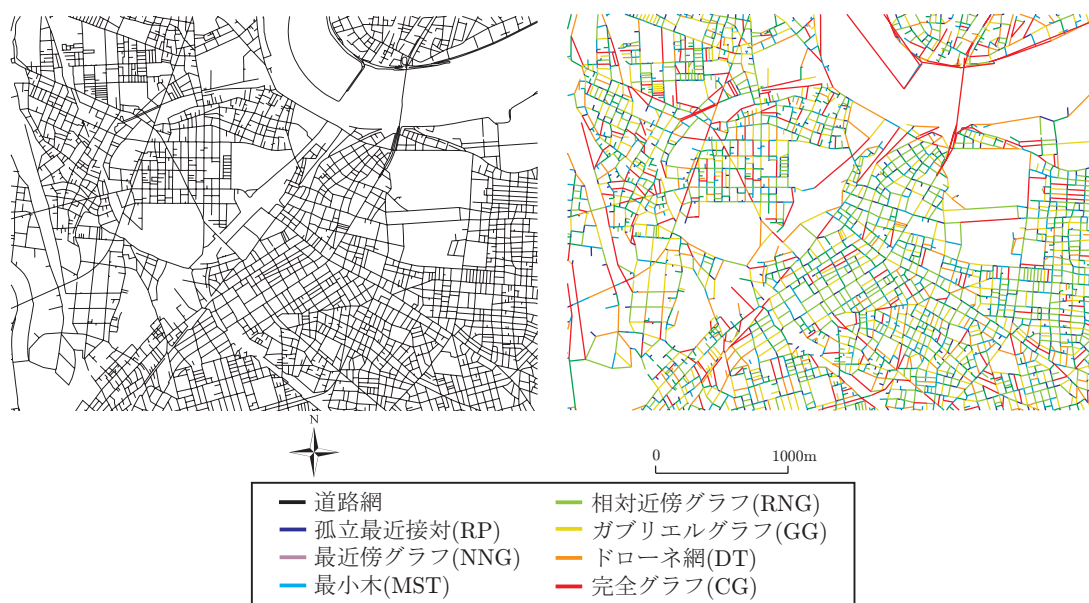


図 A.13: 道路網 (川崎)

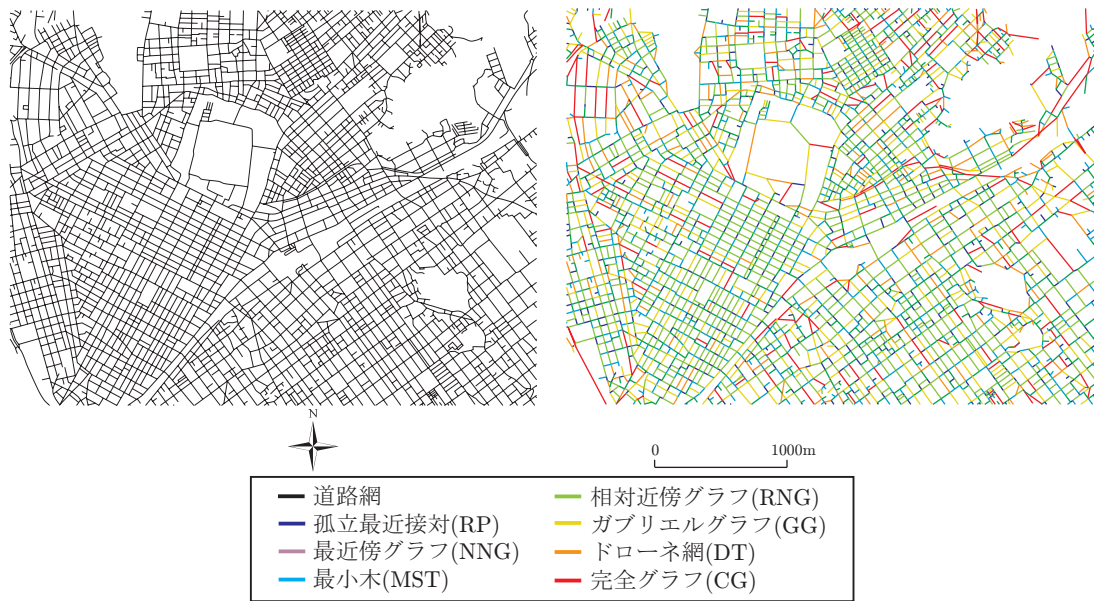


図 A.14: 道路網 (静岡)

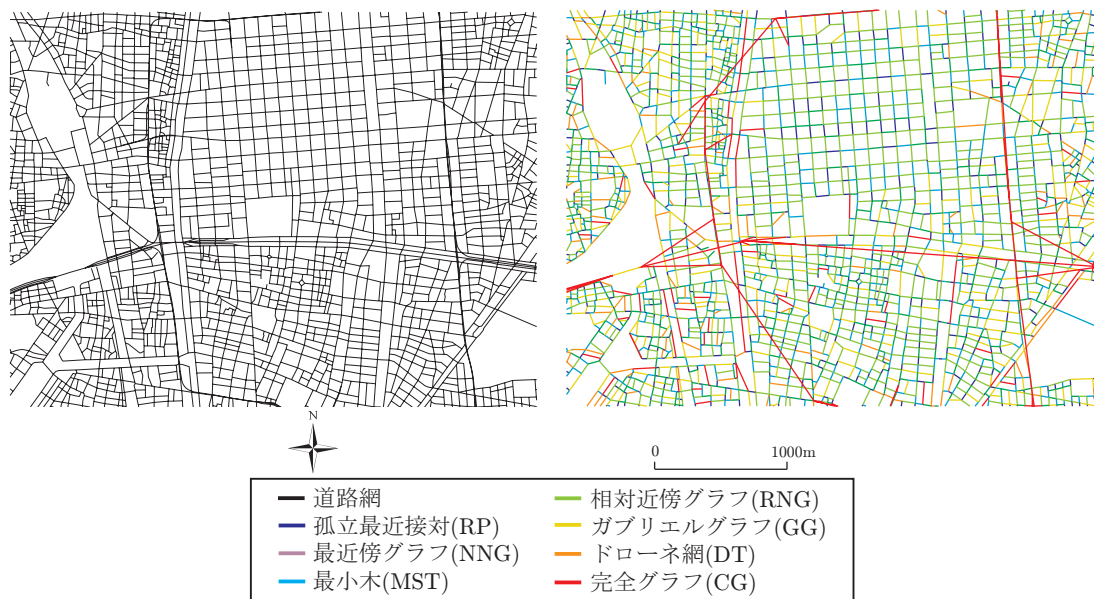


図 A.15: 道路網 (名古屋)

付 録 A 都市内道路網に関する地理情報データ

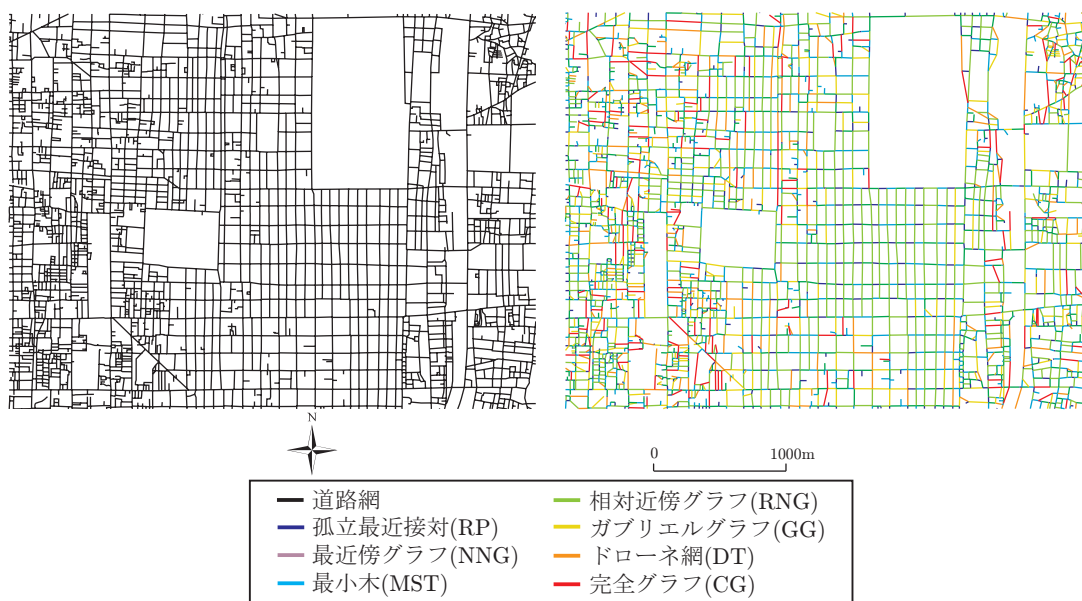


図 A.16: 道路網 (京都・上京)

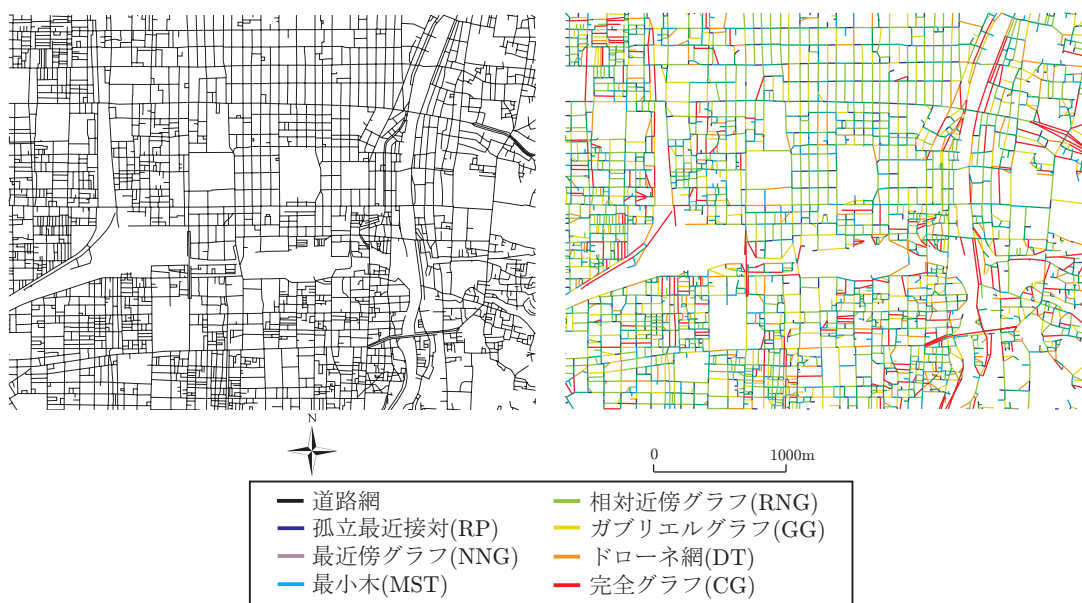


図 A.17: 道路網 (京都・下京)

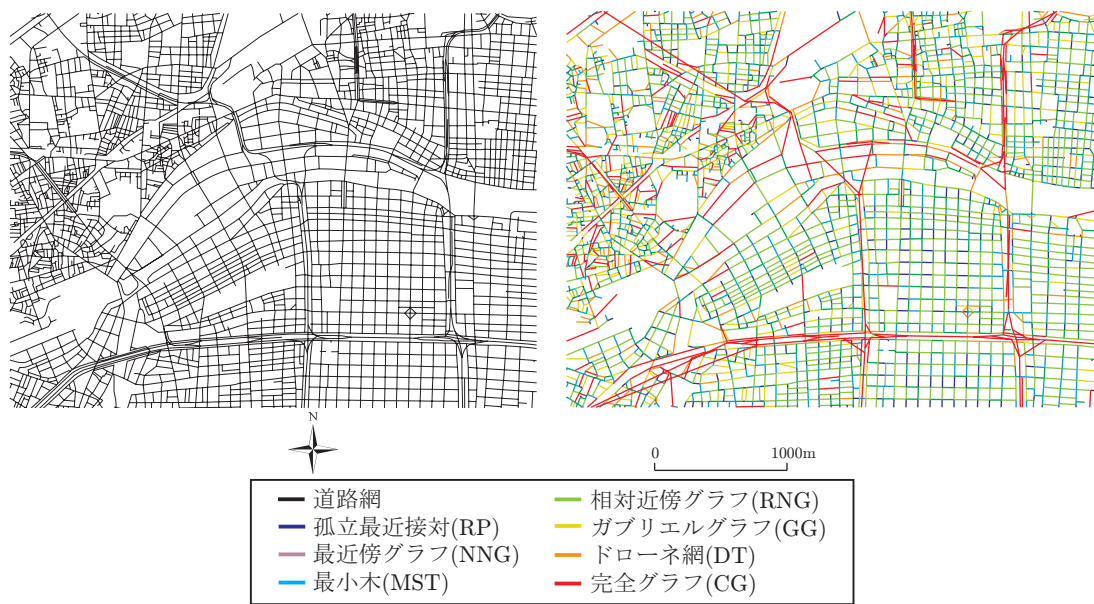


図 A.18: 道路網 (大阪・中之島)

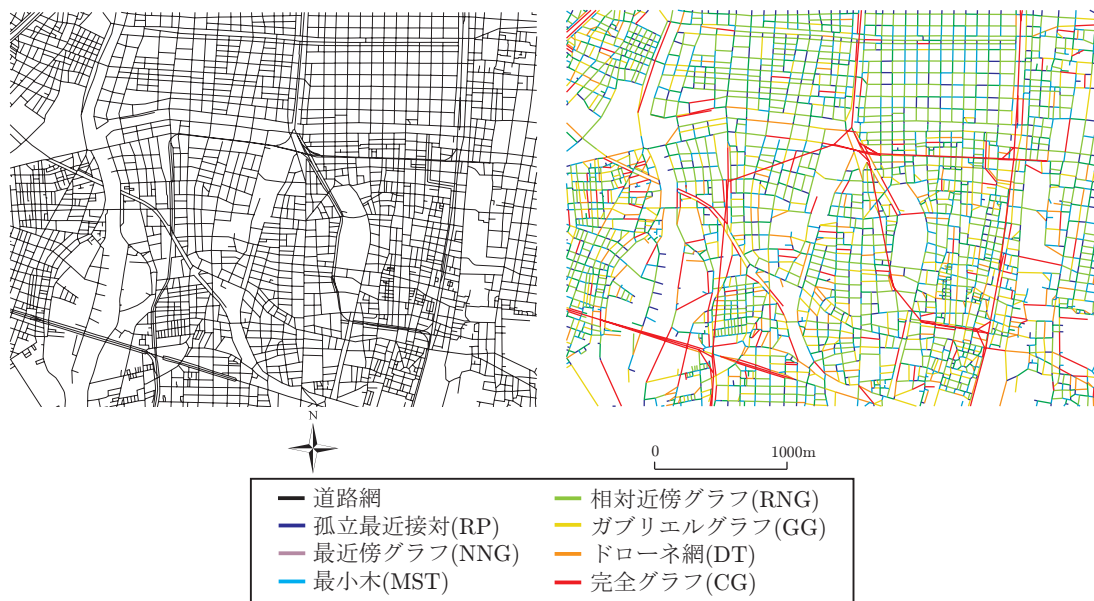


図 A.19: 道路網 (大阪・難波)

付 録 A 都市内道路網に関する地理情報データ

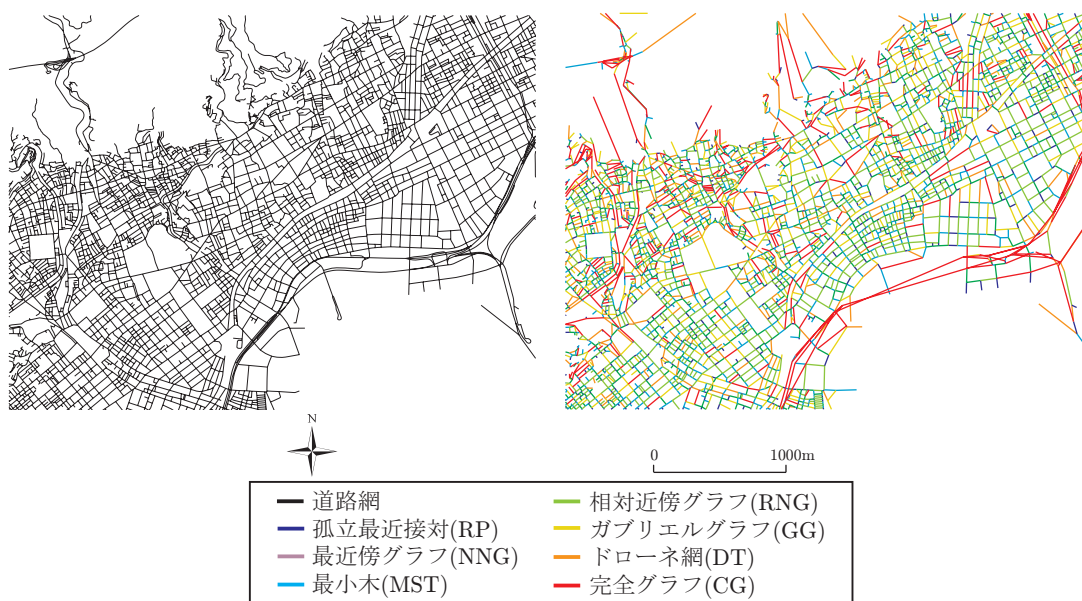


図 A.20: 道路網 (神戸)

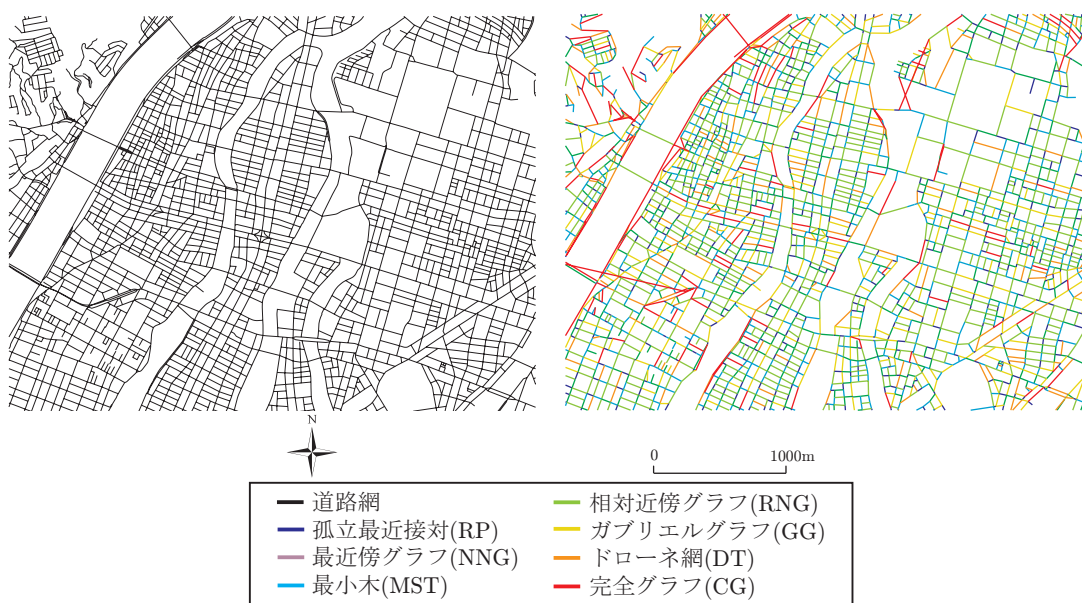


図 A.21: 道路網 (広島)

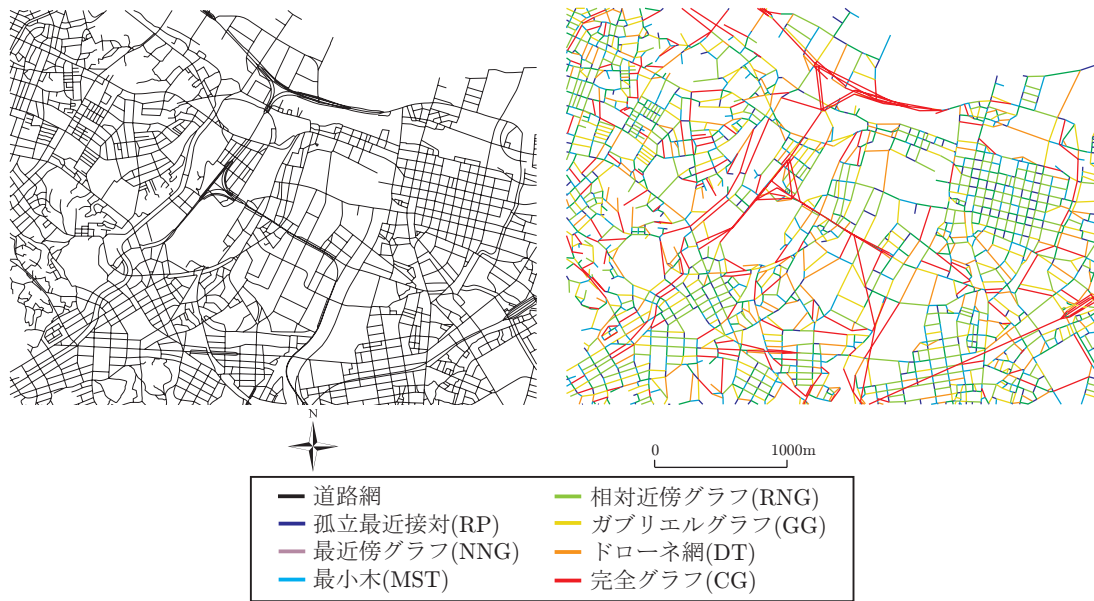


図 A.22: 道路網 (北九州)

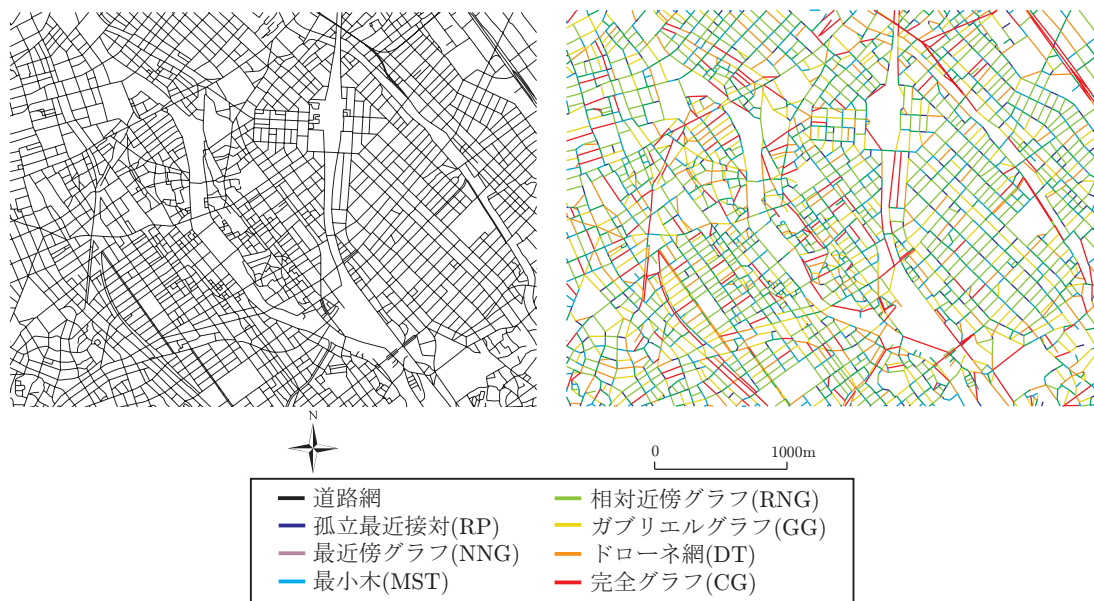


図 A.23: 道路網 (福岡)

A.2 米国主要都市

第 3 章で用いた米国主要都市の道路網の地図データをまとめる．

A.2.1 道路網データの作成

前節で説明した日本の数値地図とはデータ構造や座標系など大きく異なる．よって，地図作成方法も異なり，下記のようになる．まず，道路網データを各都市ごとに定義されている座標系に合わせて，平面直角座標系へと変換する．本章では直線距離による近接グラフを用いて分析を行っているので，米国主要都市が比較的高緯度にあるために，緯度経度のままでは実空間との距離の違いが大きくなってしまう．

そして，TIGER の道路網データには，道路点に関するデータが含まれていないため，道路網において次数 2 である道路点は削除して，道路辺を結合する．こうして加工した道路網データより，道路点及び道路辺を抽出を行う．

A.2.2 道路網と構築原理

各都市について，左側に道路網，右側に近接グラフによる各道路辺の構築原理をしめす．

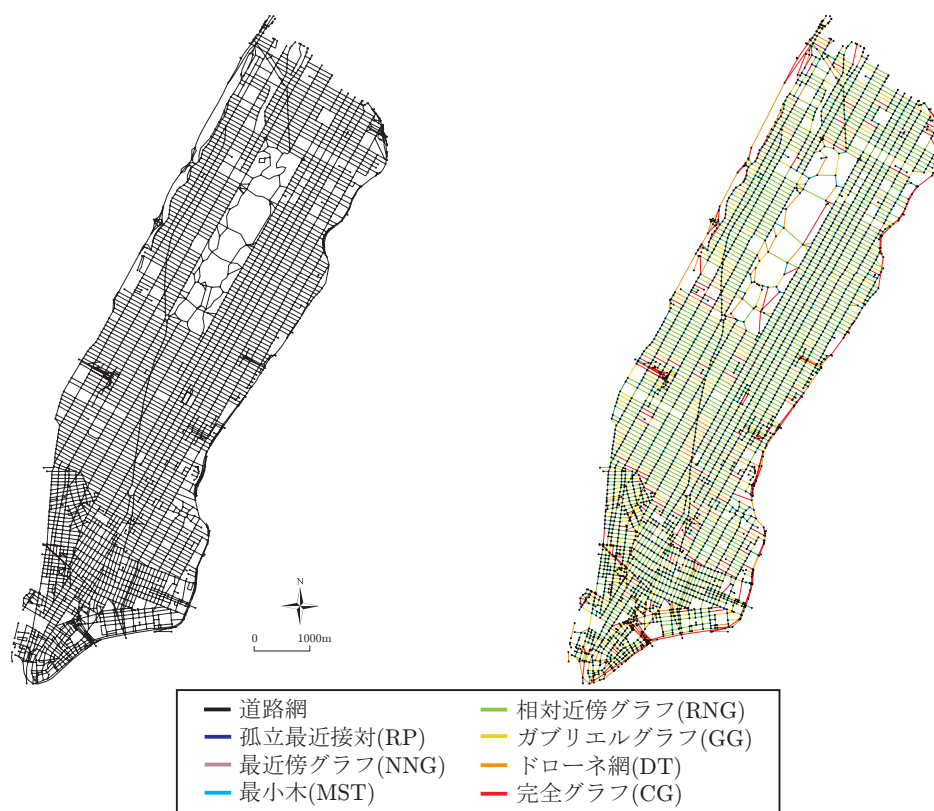


図 A.24: 道路網 (New York)

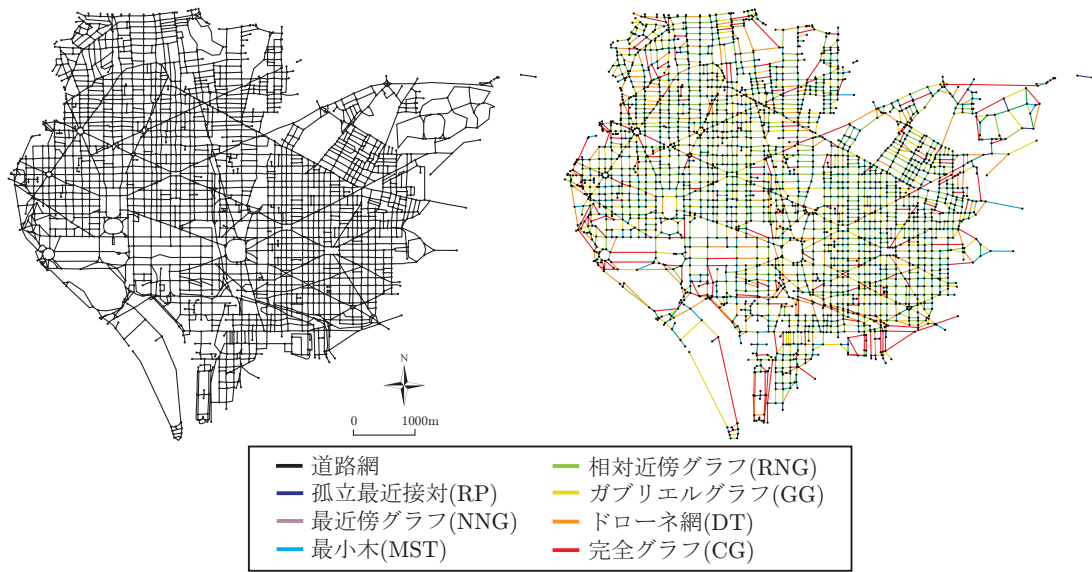


図 A.25: 道路網 (Washington D.C.)

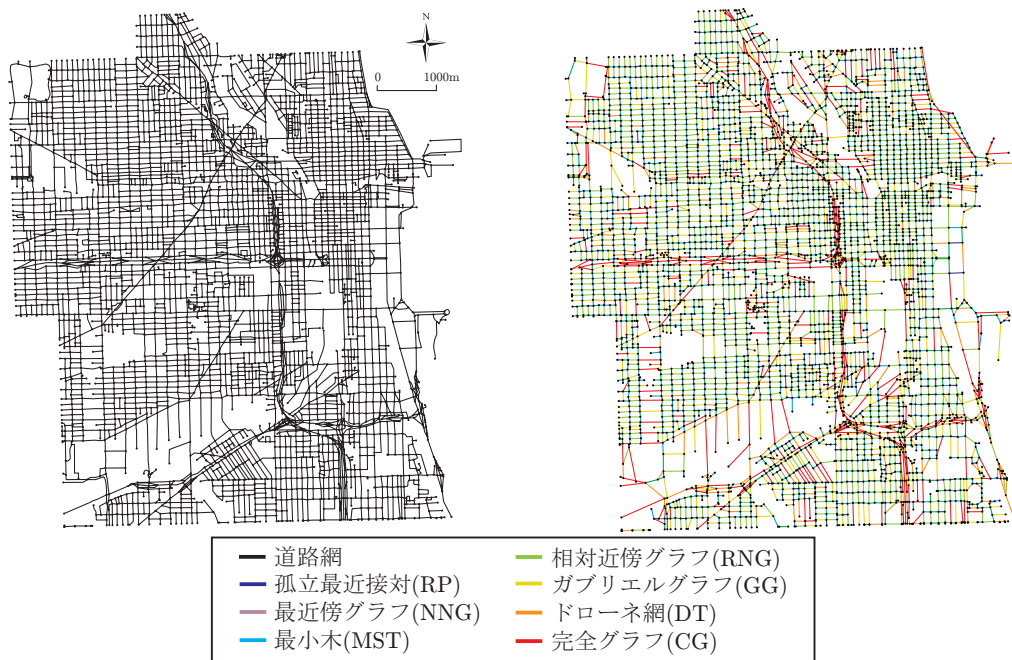


図 A.26: 道路網 (Chicago)

付 録 A 都市内道路網に関する地理情報データ

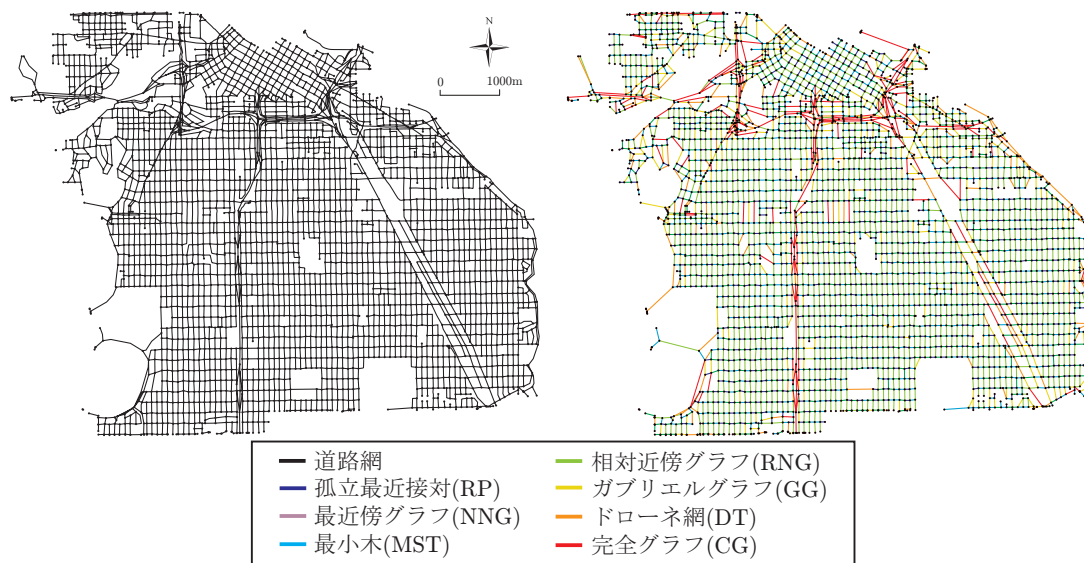


図 A.27: 道路網 (Minneapolis)

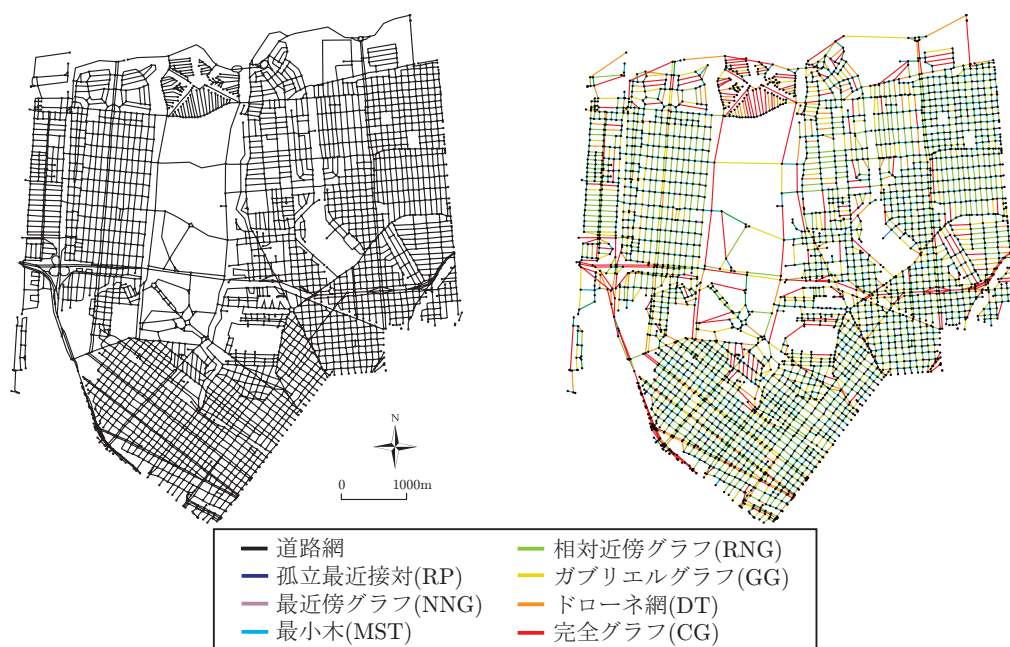


図 A.28: 道路網 (New Orleans)

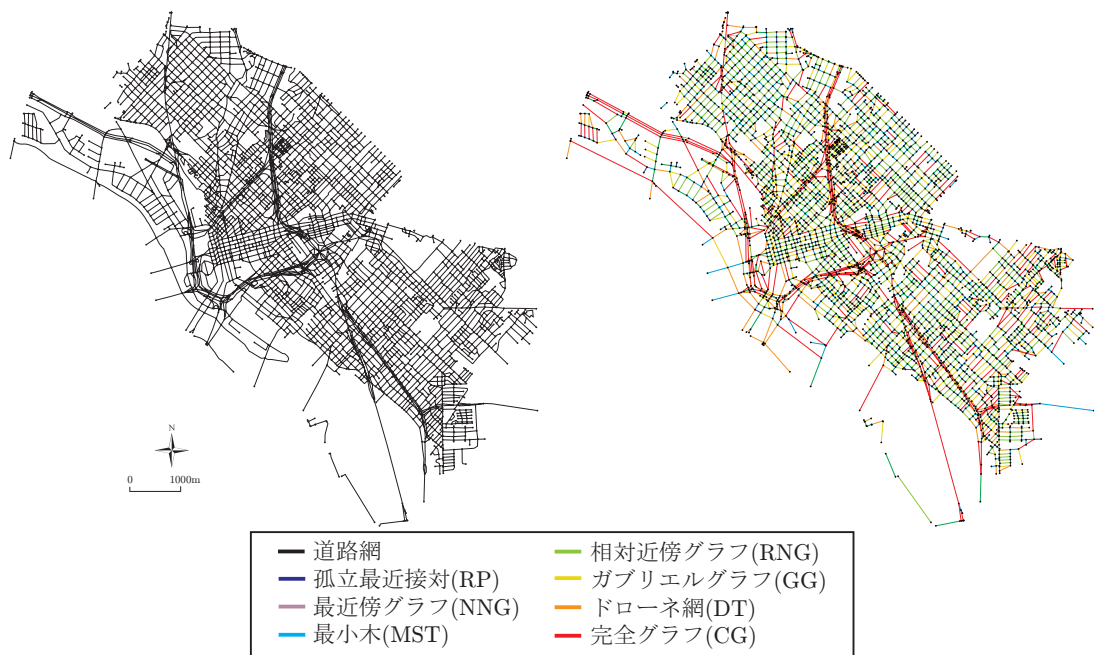


図 A.29: 道路網 (Dallas)

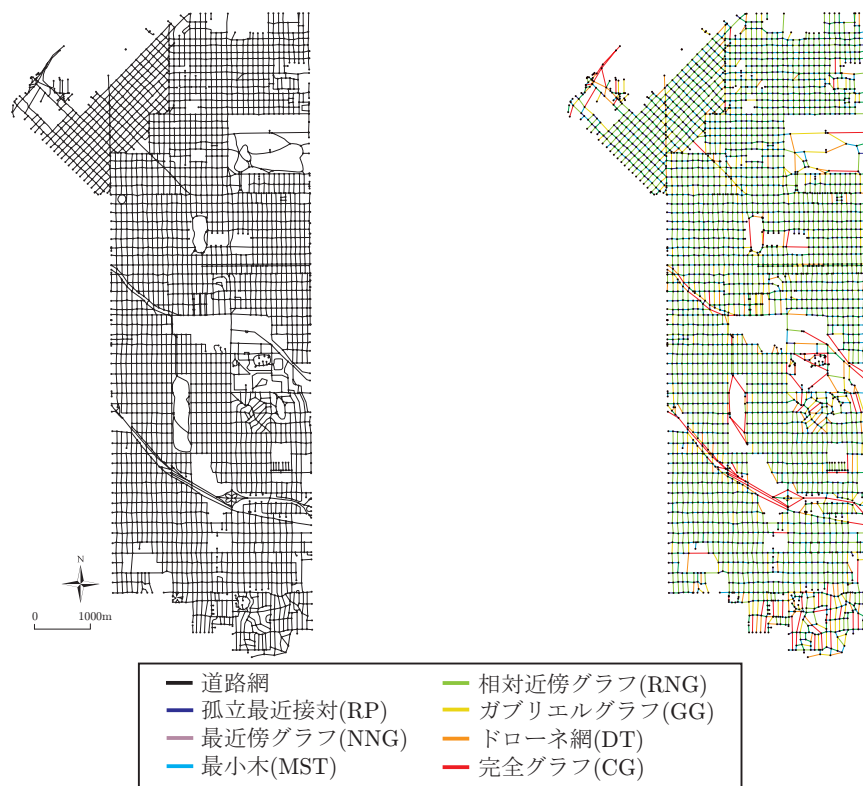


図 A.30: 道路網 (Denver)

付 録 A 都市内道路網に関する地理情報データ

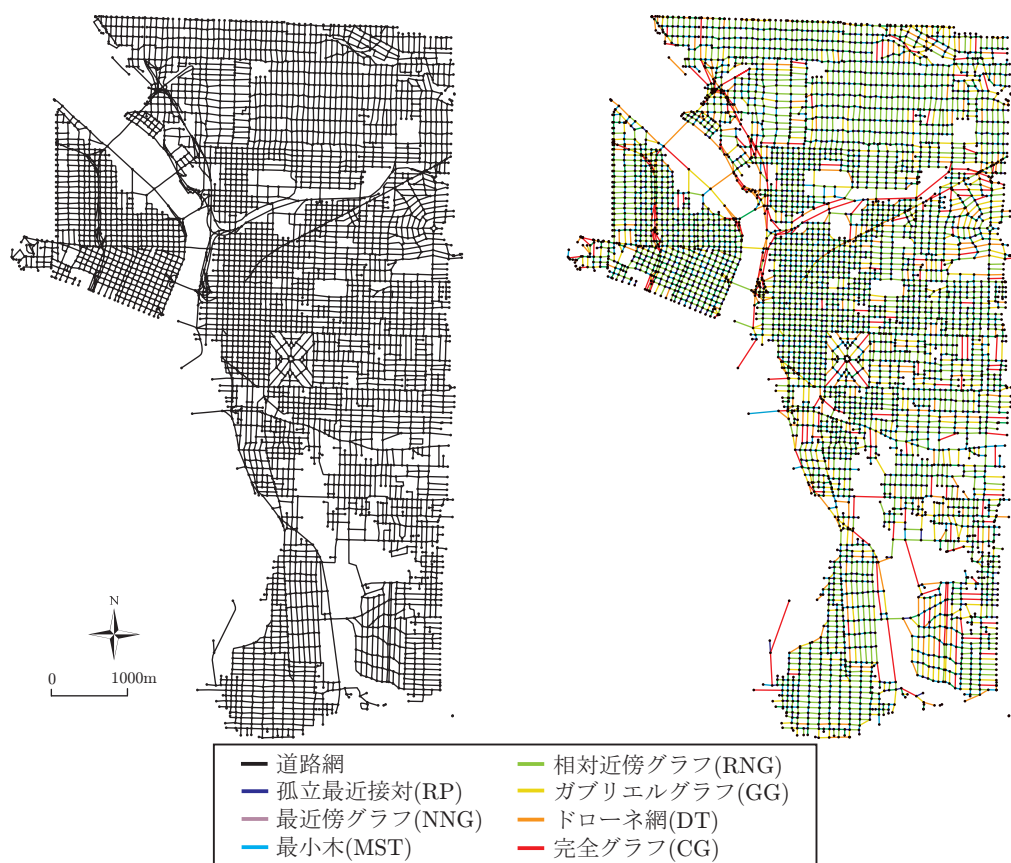


図 A.31: 道路網 (Portland)

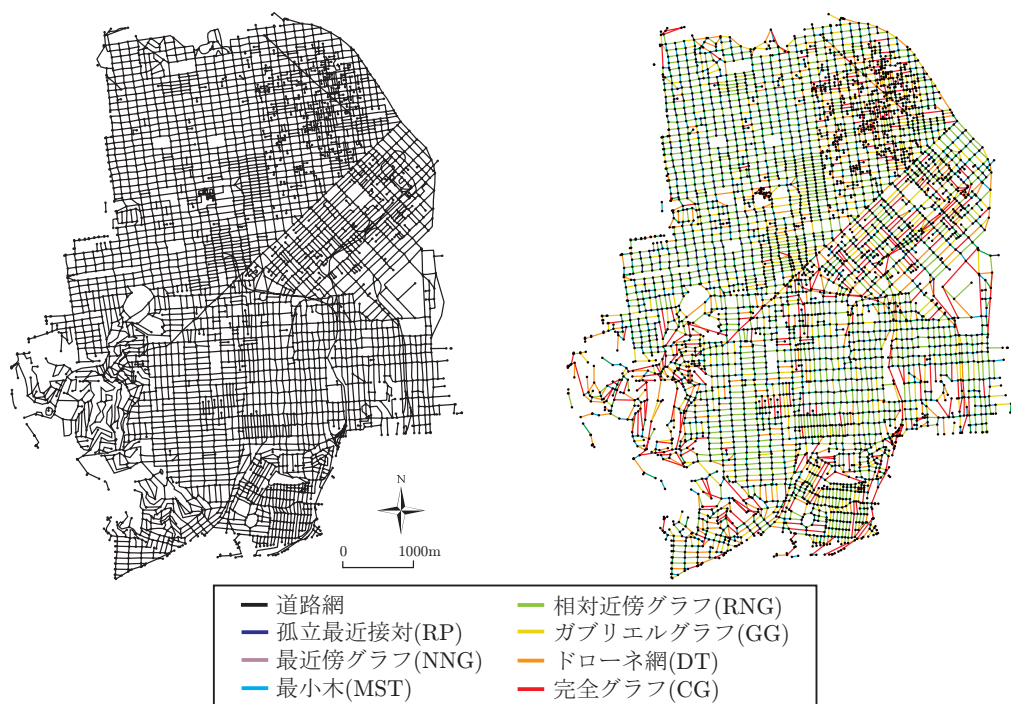


図 A.32: 道路網 (San Francisco)

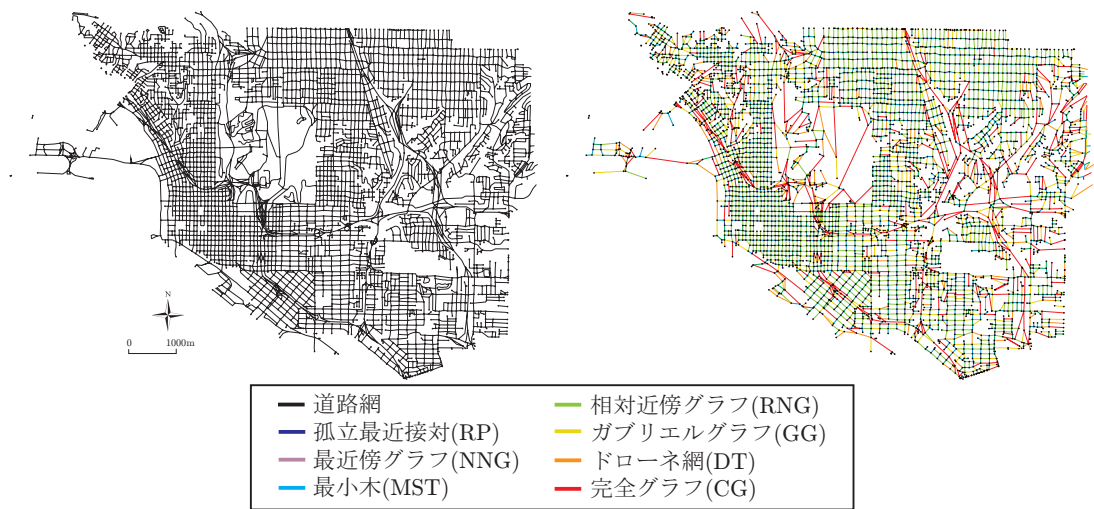


図 A.33: 道路網 (San Diego)