

グラフ理論を適用した地下街路形態の分類に関する研究

A study on the classification of the underground street network by the graph

関口 佳司 * ・ 北村 眞一 **

Keiji SEKIGUCHI, Shin-ichi KITAMURA

The purpose of this study is to classify the underground streets and to find the characteristics of the classified groups. First of all, 21 major underground streets in Japan were picked up and made an on-the-spot survey. Then each underground streets network was translated into the graph. And these graphs were classified into four groups by using the cluster analysis. The first is "The Simple Tree Type" which does not contain the cycle and consists of just a few trees; The second is "The Forest Type" which consists of many trees; The third is "The Radiation and Cycle Type" which consists of trees connected around the cycle; The forth is "The Blockade Cycle Type" which consists of multiplex cycles. The classification of graph was mainly explained by "degree of a vertex", "number of bridges" and "cycle rank of a graph".

1. 研究の背景と目的

我が国の地下街は鉄道や地下鉄の駅周辺に発達し、戦前の東京須田町地下鉄ストア（1932）以来これまでに管理主体別に集計すると90を越える地下街がつくられた。地下街の建設は徐々に拡大接続され、地上部の複雑な公共街路網の制約を受け、その空間構成は複雑なネットワーク構造となった。そのため、我が国の地下街は一般にわかりにくいといわれている。

地下街のわかりやすさに関する研究は、1950年代以降地下街の建設が本格化するとともに、内外で多く行われてきた。それらは、（1）地下街路の方向や距離の認知を分析するもの、（2）地下街景観の分類とゾーンの特徴を分析するもの、（3）利用者の行動分析からサインシステムなどを再検討するものに大別される。しかしながら基本的な認知構造の整理がないまま部分的な問題に取り組んできたため、地下空間のわかりにくさに関する根本的な解決策としては不十分であると考える。そこで本研究では、“ある現象に対して一定の法則を見出し、これを“点”と“線”を用いて幾何学的な図形として表し、解析するグラフ理論”¹⁾を地下街路に適用し、グラフ形態による分類化とその特性を明らかにすることを目的とした。

キーワード：地下街路形態、グラフ理論

* 正会員 技術士 西武建設 土木技術設計部 技術課 係長

** 正会員 工学博士 山梨大学 工学部 循環システム工学科 教授

2. 研究方法

本研究は、図-1 に示すフローに則り分析を進めた。

- 1) 既存地下利用施設データベース²⁾を利用し、我が国の地下利用施設の中から地下街路面積（公共地下通路面積+店舗面積）が 10,000 m²以上の地下街を抽出する。
- 2) 抽出された地下街を踏査する。踏査に当たっては、事前に準備した土地利用図および当該地下街で入手した地下街マップから地下街路形態、空間構成、利用施設を把握すると共に、可能な限り地下街の現況を写真撮影する。
- 3) 地下街路の踏査によって得られた情報から主題図³⁾、点と線から構成されるグラフを作成する。
- 4) 作成したグラフにグラフ理論を適用させ、抽出した地下街のグラフ理論特性表をもとにクラスター分析および統計処理を行い地下街グラフの分類化を図る。
- 5) 分類されたグラフごとに地下街路構造の特性をグラフ理論から明らかにする。

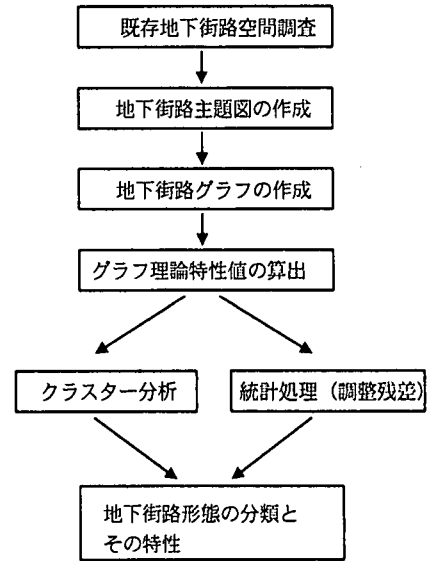


図-1 研究フロー略図

3. 研究対象

地下利用施設データベースから抽出・踏査した地下街および地下通路の中から、地下街路面積（公共地下歩道+店舗面積）10,000 m²以上を有する地下街 21 施設を研究対象とした。（図-2、表-1）

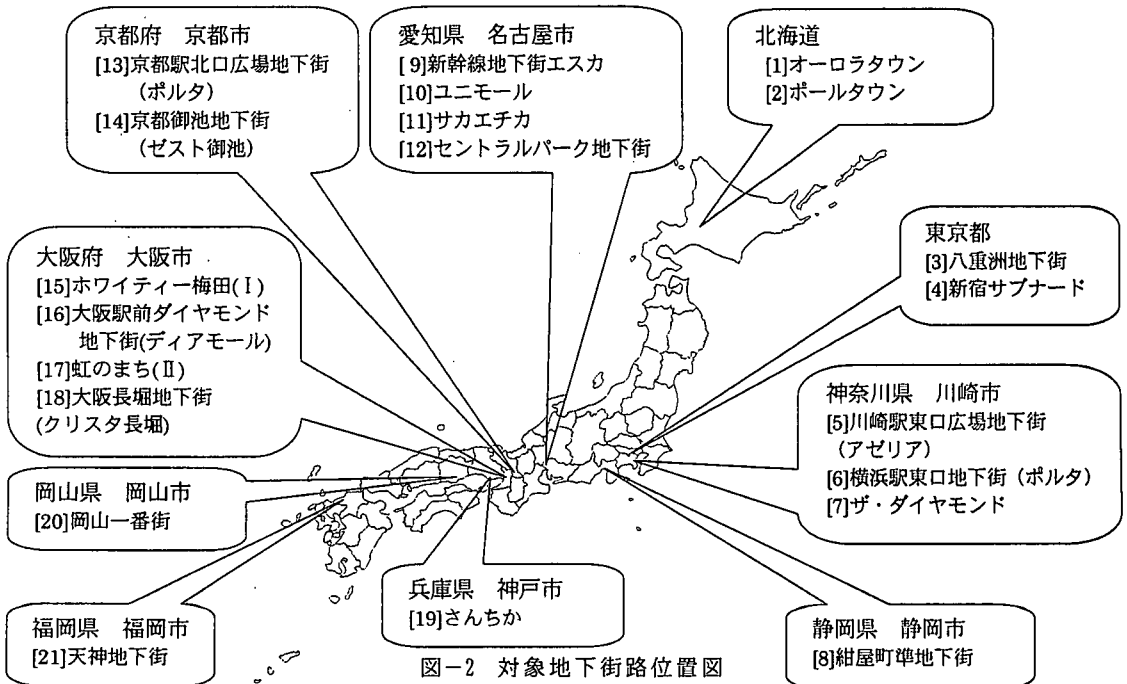


図-2 対象地下街路位置図

表-1 研究対象地下街路データ

地下街名	所在地	開設年月	公共地下通路面積 (a)	店舗面積 (b)	地下街路面積 (a)+(b)	(a) (a)+(b)
1 大通り地下街(オーロラタウン)	北海道 札幌市	1971. 11	7,785.6	6,615.4	14,401.0	54.1%
2 札幌駅前地下街(ポールタウン)	北海道 札幌市	1971. 11	6,464.0	4,500.1	10,964.1	59.0%
3 八重洲地下街	東京都 中央区	1965. 6	15,178.0	18,870.3	34,048.3	44.6%
4 新宿サブナード	東京都 新宿区	1973. 9	10,026.2	7,383.7	17,409.9	57.6%
5 川崎駅東口広場地下街(アゼリア)	神奈川県 川崎市	1986. 10	15,849.0	11,718.0	27,567.0	57.5%
6 横浜駅東口地下街(ポルタ)	神奈川県 横浜市	1980. 11	8,997.0	9,258.0	18,255.0	49.3%
7 ザ・ダイヤモンド	神奈川県 横浜市	1964. 12	7,131.3	12,242.7	19,374.0	36.8%
8 紺屋町準地下街	静岡県 静岡市	1965. 4	2,663.9	10,057.0	12,720.9	20.9%
9 新幹線地下街エスカ	愛知県 名古屋市	1971. 12	7,347.1	6,490.1	13,837.2	53.1%
10 ユニモール	愛知県 名古屋市	1970. 11	8,384.6	6,161.9	14,546.5	57.6%
11 サカエチカ	愛知県 名古屋市	1969. 11	5,947.4	6,081.9	12,029.3	49.4%
12 セントラルパーク地下街	愛知県 名古屋市	1978. 11	14,960.0	10,706.1	25,666.1	58.3%
13 京都駅北口広場地下街(ポルタ)	京都府 京都市	1980. 11	11,123.7	7,880.8	19,004.5	58.5%
14 京都御池地下街	京都府 京都市	1997. 10	6,332.8	4,817.2	11,150.0	56.8%
15 ホワイティー梅田(Ⅰ期)	大阪府 大阪市	1963. 11	6,586.9	8,927.7	15,514.6	42.5%
16 虹のまち(Ⅱ期)	大阪府 大阪市	1971. 12	9,961.0	10,786.6	20,747.6	48.0%
17 大阪駅前ダイヤモンド地下街(ディアモール)	大阪府 大阪市	1995. 10	12,470.0	7,420.0	19,890.0	62.7%
18 大阪長堀地下街(クリスタ長堀)	大阪府 大阪市	1997. 5	17,107.0	10,451.0	27,558.0	62.1%
19 さんちか	兵庫県 神戸市	1965. 10	3,092.7	9,251.6	12,344.3	25.1%
20 岡山一番街	岡山県 岡山市	1974. 8	6,668.9	8,065.0	14,733.9	45.3%
21 天神地下街	福岡県 福岡市	1976. 9	8,981.0	7,521.0	16,502.0	54.4%

4. 地下街路空間主題図とグラフ

既存地下街路空間にグラフ理論を適用する手法として、地図学において“一般図”を基図(ベースマップ)にして何らかの主題(テーマ)を強調して表現する“主題図”を用いた。また、主題図を分類した i) 定性的点データ地図, ii) 定量的点データ地図, iii) 定性的線データ地図, iv) 定量的線データ地図, v) 定性的面データ地図, vi) 定量的面データ地図, の6種類の中では i), iii), v) を合わせた定性的点・線・面データ地図に相当する地図として地下街路を表した。一方、記号論でいわれる「記号と記号の結合についての統辞論 syntactics (地図の文法)、記号とその指示物の関係についての意味論 semantics (地図の辞書)、そして記号を修飾して美しく巧みに表す修辞」に関しては、凡例によるデータの記号化、点記号、線記号、面記号を用いた尺度データとしての地下街にグラフ理論を適用させた⁴⁾。

地下街路主題図から地下街路グラフの作成方法に関して新宿駅付近地下街路を例にとって以下に記す。

- 1) 地下街路が設置されている地上市街地図を縮尺表示して作成する。
- 2) 地下街踏査によって収集した情報を基に地下街路空間の基本エレメントを表す凡例を設定する。
(図-3)
- 3) 地下街踏査によって収集した情報を凡例に合わせて地上市街地図に書き込み、地下街路を表す。
- 4) 地上地下合成図から地上市街地図を削除し、地下街路主題図を完成させる。(図-4)
- 5) 地下街路主題図から当該地下街の連結街路構造を表すネットワークを抜き出す。(図-5)
- 6) 当該地下街ネットワークからグラフを作成する。なお、グラフはネットワークと異なり、点および辺の数とその連結関係のみを基に解析をすることから、全体形状、点および辺の配置関係が把握できる程度に交差間距離を調整してわかりやすく表す。(図-6)

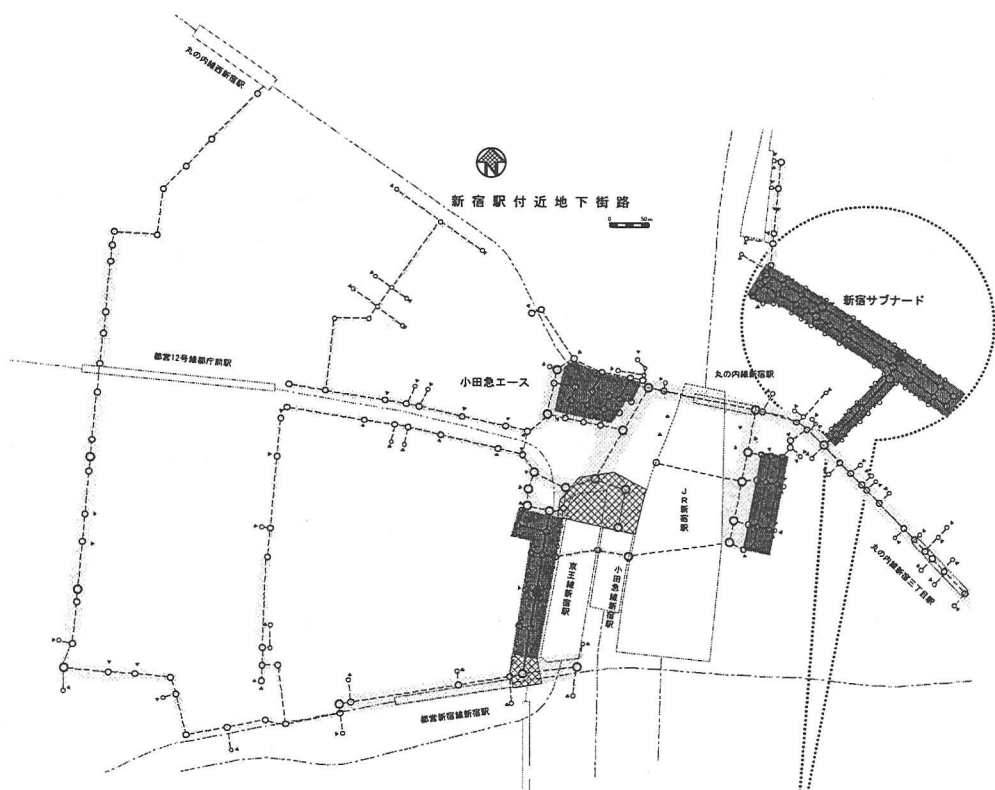


図-4 新宿駅付近主題図

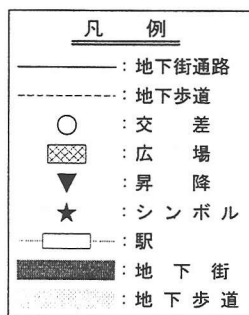


図-3 凡例

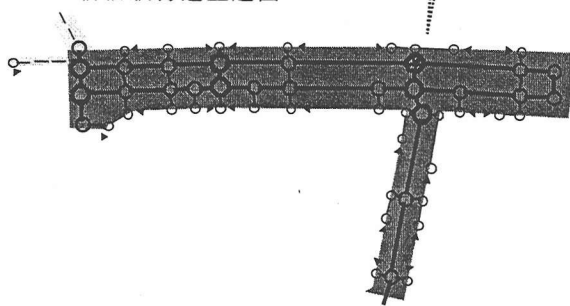


図-5 新宿サブナード ネットワーク

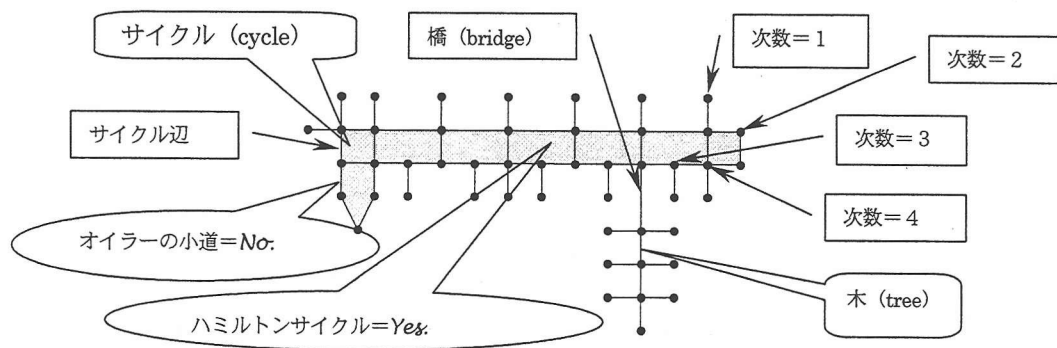


図-6 新宿サブナード グラフ

同様に、対象とした地下街路面積 10,000 m²以上の地下街 21 施設のグラフを作成すると、図-7 になる。

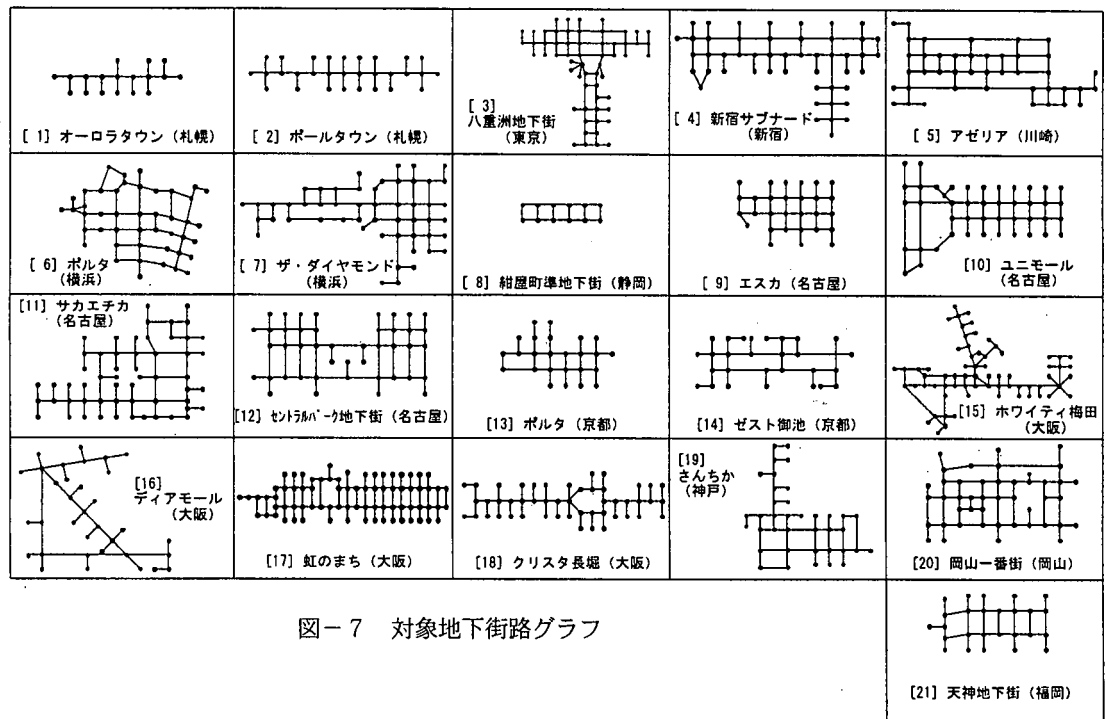


図-7 対象地下街路グラフ

5. グラフ理論の適用

5.1 グラフ理論特性

グラフ理論^(※)とは「ある現象に対して一定の法則を見出し、これを“点”と“線”を用いて幾何学的な図形として表すことによって、現象の関係を視覚的に捉え分析する」ことをいう。そこで本研究においては、グラフ理論から 1) グラフの構造 (ツリー、サイクル)、2) グラフの要素 (点: 総数・次数 / 線: 総数・サイクル辺・橋)、3) 理論定理 (サイクル階数、小道の数、オイラーの小道の有無、ハミルトンサイクルの有無) を適用して地下街路のグラフ特性を明らかにする。適用した結果を表-2 に示す。

なお、地下街路に共通なグラフ理論特性としては、“連結グラフ”、“完全グラフ”、“平面グラフ”、“正則していない”、“マッチングを成す”、“多角形グラフ (サイクル形態の場合)”、“循環的な交代道が存在 (サイクル形態の場合)” が挙げられる。

5.2 グラフ理論特性による地下街の分類

次に、表-2 に示された地下街のグラフ理論特性値から、原データ距離 (グラフ特性値による地下街路形態の親疎の強さ) はユークリッド距離を用い、樹形図の作成過程で個々の地下街をまとめた点の相互の合併後距離はワード法を適用し (表-3)、クラスター分析⁹⁾すると図-8 になる。

表-2 地下街路のグラフ理論特性

(単位: 個所, Y: 該当, N: 非該当)

項 目	(m) 公共地下通路面積	構 造		要 素										定 理					
				木	サイクル	点					辺					サイクル階数	小道の数	オイラーの小道	ハミルトンサイクル
						総 数	次 数					総 数	サイクル 辺	橋					
		1 (端点)	2 (折れ点)	3 (丁字交差)	4 (十字交差)		5 (放射交差)	5以上											
地下街路																			
オーロラタウン (札幌)	7,785.6	1	0	18	11	0	5	2	0	17	0	17	0	8	N	N			
ポールタウン (札幌)	6,464.0	1	0	30	19	0	5	6	0	29	0	29	0	12	N	N			
八重洲地下街 (東京)	15,178.0	2	1	59	22	5	15	16	1	73	47	26	15	14	N	Y			
サブナード (新宿)	10,026.2	1	1	49	22	5	8	14	0	56	31	25	8	15	N	Y			
アゼリア (川崎)	15,849.0	3	1	42	6	5	24	7	0	58	48	10	17	15	N	Y			
ポルタ (横浜)	8,997.0	1	1	45	10	11	12	12	0	59	48	11	14	11	N	N			
ザ・ダイヤモンド (横浜)	7,131.3	4	3	52	15	12	13	12	0	63	41	22	12	14	N	Y			
紺屋町準地下街 (静岡)	2,663.9	0	1	12	0	4	8	0	0	16	16	0	5	4	N	Y			
エスカ (名古屋)	7,347.1	0	1	29	10	0	10	9	0	38	28	10	10	10	N	Y			
ユニモール (名古屋)	8,384.6	0	1	45	17	5	7	16	0	56	39	17	12	12	N	Y			
サカエチカ (名古屋)	5,947.4	2	1	56	25	6	13	12	0	62	32	30	7	19	N	N			
セントラルパーク (名古屋)	14,960.0	0	1	44	17	0	13	14	0	56	39	17	13	15	N	Y			
ポルタ (京都)	11,123.7	2	1	25	10	4	4	7	0	29	17	12	5	7	N	Y			
ゼスト御池 (京都)	6,332.8	3	1	29	12	4	8	5	0	32	17	15	4	10	N	Y			
ホワイティ梅田 (大阪)	6,586.9	3	1	68	31	4	22	9	2	74	31	43	9	27	N	N			
虹のまち (大阪)	9,961.0	1	1	77	28	8	16	25	0	96	67	29	20	22	N	Y			
ディアモール (大阪)	12,470.0	2	1	34	19	2	8	4	1	34	10	24	1	14	N	Y			
クリスタ長堀 (大阪)	17,107.0	2	1	49	26	3	15	4	1	49	8	41	1	21	N	Y			
さんちか (神戸)	3,092.7	2	1	38	13	6	11	8	0	45	26	19	8	12	N	Y			
岡山一番街 (岡山)	6,668.9	0	1	45	12	1	22	10	0	60	48	12	16	17	N	Y			
天神地下街 (福岡)	8,981.0	0	1	26	11	0	9	6	0	31	20	11	6	10	N	Y			

ツリー主体型

地下街路グラフ

サイクル主体型

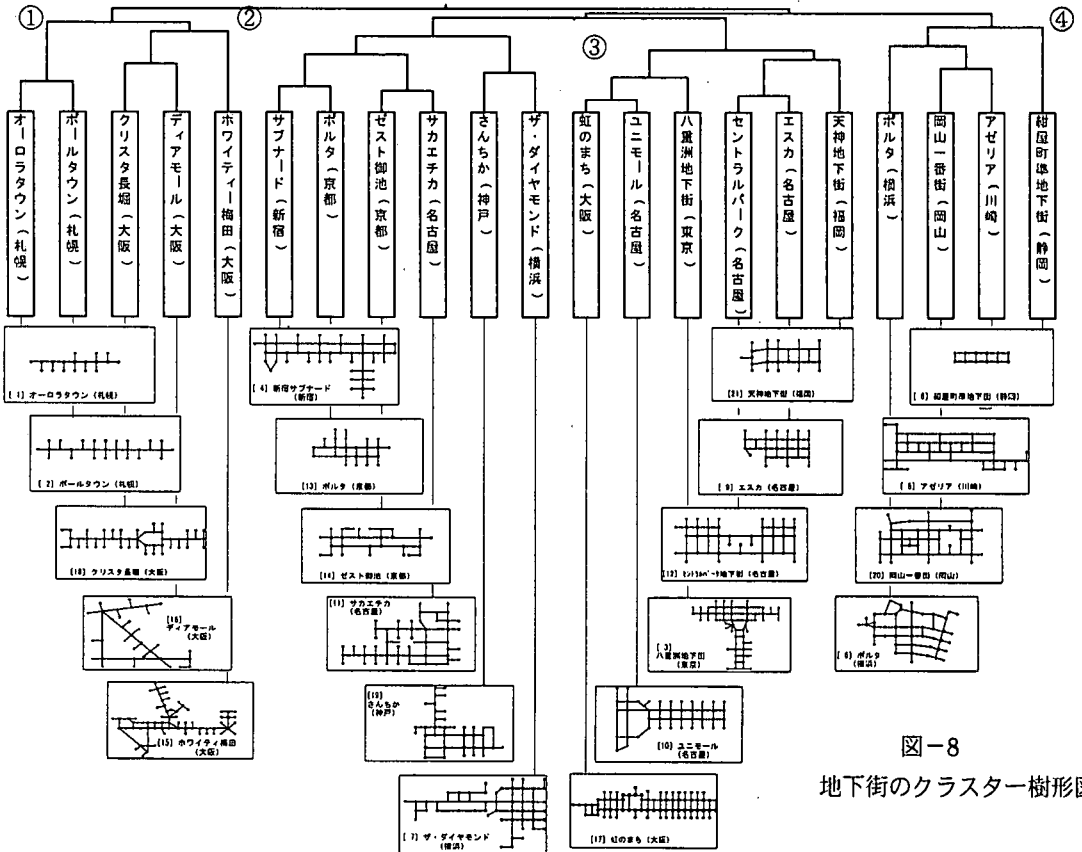


図-8

地下街のクラスター樹形図

表－3 クラスタ分析による地下街間の距離

地下街No.	12 - 15	14 - 16	7 - 10	6 - 8	1 - 2	12 - 13	9 - 11	19 - 20	3 - 4	14 - 17
距離	0.046	0.074	0.077	0.087	0.104	0.115	0.127	0.129	0.144	0.164
地下街No.	6 - 7	12 - 14	18 - 19	6 - 9	3 - 5	18 - 21	1 - 3	6 - 12	6 - 18	1 - 6
距離	0.182	0.220	0.245	0.249	0.270	0.373	0.433	0.456	0.885	1.668

6. グラフ理論からの地下街路形態の特性

次に、各地下街におけるグラフ構造とグラフ理論特性の関連を考察するために、表－2のグラフ理論特性値から相関の強さを表す調整残差（ R_{ij} ）を算出する。調整算差は(1)式から算出し、その相関の強さとして、 $R_{ij} \geq 2.58$ の場合は“特に有意”で結論が間違ふ確率が1%、 $1.96 \leq R_{ij} < 2.58$ の場合は“有意”で結論が間違ふ確率が5%とされている^{6), 7)}。各地下街におけるグラフ理論特性要素の調整算差を表－4に示す。

$$R_{ij} = \frac{n_{ij} - F_{ij}}{\sqrt{F_{ij}(1 - n_{i\cdot}/n)(1 - n_{\cdot j}/n)}} \quad \dots\dots (1) \text{式}$$

$n_{i\cdot}$: 横計
 $n_{\cdot j}$: 縦計
 n : 合計
 F_{ij} : 期待度数

判 定

$R_{ij} \geq 2.58$
 $1.96 \leq R_{ij} < 2.58$

: 特に有意
: 有意

表－4 地下街路のグラフ理論特性と調整残差

項 目		構 造		要 素								定 理				
		木	サイクル	総 数	点					辺			サイクル階数	小道の数	ハミルトン サイクル	
					1 端点	2 折れ線	3 丁字交差	4 十字交差	5 放射交差 以上	総 数	サイクル 辺	橋				
地下街路																
①	オーロラタウン（札幌）	-0.62	0.62	0.61	2.08	-1.27	0.24	-0.87	-0.30	-0.47	-3.63		-1.88	1.25	-0.55	
	ポールタウン（札幌）	-0.81	0.10	0.83	2.08	-1.64	-0.94	0.02	-0.39	-0.44	-4.71		-2.44	1.17	-0.71	
②	クリスタ長堀（大阪）	-0.07	0.39	0.77	2.28	-0.67	0.70	-2.02	1.52	-0.60	-4.61		-2.86	1.73	0.21	
	ディアモール（大阪）	0.30	0.92	0.60	2.15	-0.61	-0.30	-1.20	1.99	-0.54	-2.78	2.50	-2.25	1.22	0.58	
	ホワイトイー梅田（大阪）	-0.47	0.53	0.44	1.29	-0.97	0.88	-1.59		-0.40	-2.43	2.29	-1.33	1.27	-1.14	
③	サブナード（新宿）	-0.14	-0.51	0.28	0.94	0.19	-1.58	1.05	-0.54	-0.01	-0.44	0.50	-0.64	-0.18	0.15	
	ポルタ（京都）	0.53	1.26	0.03	0.14	1.04	-1.21	0.59	-0.38	-0.10	-0.13	0.01	-0.10	-0.45	0.82	
	サカエチカ（名古屋）	-0.26	0.13	0.45	1.07	0.38	-0.58	-0.02	-0.57	-0.14	-0.97	0.95	-1.31	0.35	-1.02	
	ゼスト御池（京都）	0.39	2.10	0.16	0.35	0.77	-0.01	-0.58	-0.41	-0.30	-0.71	0.40	-0.82	0.22	0.68	
	さんちか（神戸）	0.09	0.62	-0.02	-0.47	1.23	0.05	-0.23	-0.48	-0.02	-0.17	0.16	0.00	-0.19	0.37	
	ザ・ダイヤモンド（横浜）	1.58	1.67	-0.15	-1.28		-0.56	-0.01	-0.57	0.04	0.69	-0.75	0.28	-0.90	0.03	
	虹のまち（大阪）	-0.68	-1.09	-0.19	-0.44	0.14	-1.44	1.83	-0.70	0.39	1.81	-1.57	0.94	-0.85	-0.38	
	ユニモール（名古屋）	-0.10	-1.29	-0.12	-0.16	0.27	-1.76	1.83	-0.53	0.29	1.34	-1.16	0.82	-0.86	0.18	
	八重洲地下街（東京）	-0.38	-0.04	-0.08	-0.21	-0.35	-0.50	0.71	1.17	0.35	0.89	-0.55	0.75	-1.38	-0.09	
	エスカ（名古屋）	0.29	-1.06	-0.46	-0.63	-1.80	0.39	0.74	-0.43	0.18	1.41	-1.40	1.40	-0.12	0.57	
	セントラルパーク（名古屋）	-0.11	-1.30	-0.36	-0.20	-2.20	-0.03	1.15	-0.53	0.22	1.28	-1.20	1.12	-0.08	0.17	
	天神地下街（福岡）	0.46	-0.97	-0.10	0.27	-1.65	0.56	0.00	-0.40	-0.07	0.35	-0.52	0.20	0.44	0.75	
		ポルタ（横浜）	-0.13	-0.50	-0.35	-2.05		-0.41	0.42	-0.53	0.50		-2.66	1.37	-1.24	-0.96
	④	アゼリア（川崎）	-0.14	1.10	-0.92	-3.08	0.18		-1.21	-0.54	0.27		-2.91	2.34	-0.20	0.14
岡山一番街（岡山）		-0.17	-1.34	-0.68	-1.71	-1.80	2.28	-0.36	-0.55	0.28	2.55	-2.60	1.86	0.19	0.11	
紺屋町準地下街（静岡）		1.20	-0.69	-0.44	-2.39	2.39	2.22	-1.80	-0.28	0.02	2.32	-2.70	1.34	-0.22	1.53	

表－4より、地下街路とグラフ特性の相関（調整算差が有意）に関して以下のことがいえる。

- 1) クラスタ樹形図が収束する頂点から第1階層の分類は、グラフ理論で提示されている基本形（「ツリー」，「サイクル」）⁸⁾に適応している。すなわち、①，②タイプに属する地下街路は“橋”との相

関があり、完全なツリーではないが、「ツリー主体型」として位置付けられ、それ以外の地下街路は同様に「サイクル主体型」として位置付けられる。

- 2) ツリー主体型の中で①タイプに属する地下街路は、“橋”と“次数 1（端点）”との相関があり、単純な直線形状を中心とした形態であるといえる。そこで①タイプを「シンプル・ツリー型」と名称付ける。
- 3) ツリー主体型の中で②タイプに属する地下街路は、“橋”と“次数 5 以上（放射交差）”との相関があり、直線形状のツリーがある点を接点として複数連結されている形態であるといえる。そこで②タイプを「フォレスト・ツリー型」と名称付ける。
- 4) サイクル主体型の中で④タイプに属する地下街路は、“サイクル辺”と“次数 2 または 3”との相関があり、サイクルの外周点から外側に伸びる辺が少ない形態であるといえる。そこで④タイプを「閉塞サイクル型」と名称付ける。
- 5) サイクル主体型の中で③タイプに属する地下街は、一部相関がある要素が抽出されているがタイプを統一的に特徴付ける相関がなく、サイクル型ではあるが周辺にツリーを連結させた複合形態であるといえる。そこで③タイプを「放射サイクル型」と名称付ける。

以上、クラスター分析樹形図および調整残差による相関の分析から、グラフ理論による地下街路形態は、グラフの構造分類として挙げられている A) ツリー主体型、B) サイクル主体型の下位層として①シンプル・ツリー、②フォレスト・ツリー、③放射・サイクル、④閉塞・サイクルの 4 タイプに分類することができる。

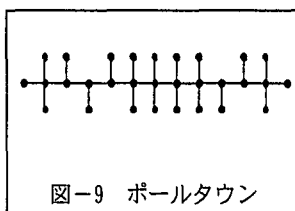
6.1 グラフ形態別の地下街路特性に関する考察

以上の調整残差（表-4）からグラフ形態別に地下街路構造の特性に関する考察を以下に論ずる。

A) ツリー主体型

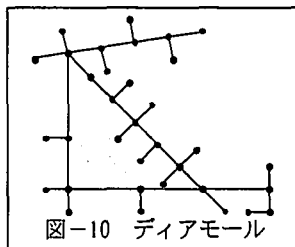
① シンプル・ツリー（木）（図-9）

直線ツリーのみから形成される構造で、“次数 5 以上（放射交差）”の点がなく、調整残差からは“橋”，“次数 1（端点）”との関連が有意でありグラフの特徴を表している。非常にシンプルで単一の街路形態を形成しているため、点から点への関係が一元的であり、地下街において目的地までのルートが限定される。一方、次数 3 または 4 の交差点が連続的に現れ単調となるため、通過交通として目的の出入り口（次数 1 の点）が見つけずらいと考える。



② フォレスト・ツリー（林）（図-10）

シンプルなサイクルの外周点に直線ツリーが接続した形態で、サイクルとツリーの複合形態を形成している。“橋”の数が“サイクル辺”より多いことからツリー主体型として扱え、あるツリー内の点から他ツリー内の点への関係が一元的でなく、サイクルの“サイクル階数”に影響される。また、調整残差からは共通して“橋”に関連があり、“次数 1（端点）”，“次数 5 以上（放射交差）”の点との関連が有意でありグラフの特徴を表している。一方、複数のツリーが単純なサイクルに連結されていることから放射交差点またはサイクルを中心にして各ツリーの位置を全体的に捉えることができ目的地点を把握しやすいと考える。



B) サイクル主体型

③ 放射サイクル (図-11)

対象地下街路の中で最も多い構造で、形態的には②フォレスト・ツリーに類似しているが、“サイクル辺”の数が“橋”の数より大きいことからサイクルが中心となる。そのため、あるツリー内の点から他のツリー内の点への関係がフォレスト・ツリーより多種になりサイクルの“サイクル階数”に影響される。一方、複数のサイクルを中心にツリーが複数連結されていることから、あるツリー内の点からサイクルを経由して他のツリーの点に至る場合、サイクル内のツリー連結点を把握しづらいと考える。しかしツリー連結点が既知の場合は、サイクル内の他点と異なる特徴から位置確認の基準点となりうると考える。

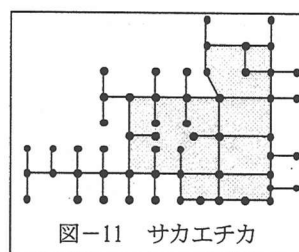


図-11 サカエチカ

④ 閉塞サイクル (図-12)

完全な閉塞サイクルである「紺屋町準地下街（静岡）」以外は“次数1（端点）”の点を有する形態となっている。しかし、次数1の点の数が“小道”の数より多いことから③放射サイクルと異なり閉塞サイクルとして扱える。また、調整残差からは“サイクル辺”，“次数1（端点）”，さらに“次数5以上（放射交差）”の点との関連が有意でありグラフの特徴を表している。一方、サイクルが多重に連結され多種の経路選択が可能であることから当該地下街路の熟知度によって迷路性の度合いの差が大きく現れる。したがって、当該地下街を熟知している利用者にとっては非常に便利な構造であるが、初めての利用者にとってはわかりづらい構造になると考える。

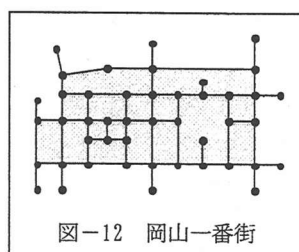


図-12 岡山一番街

6.2 地下街路のグラフ理論特性と評価に関する考察

次に、グラフ理論から評価できると考えられる事項に関して以下に述べる。

- (1) 安全性：グラフ特性として“次数1の点”と“橋”が挙げられる。次数1の点すなわち通路端部は一般に出入り口と接続されており、次数1の点が多いほど地下街路からの脱出が可能であり安全性が高いといえる。また、“橋”は「橋を通る以外双方の点に至ることができない辺で、グラフを二つに分ける」ことから、災害等による橋の切断はサイクルの孤立化による危険性と分断の安全性の二面性を持つ。したがって、構造的にはツリー主体型が単純でわかりやすいが避難路選択および災害の分断の点からはサイクル主体型が有利と考える。
- (2) 利便性：利便性は利用者の観点から目的地に快適に到達する評価で、複雑性や明瞭性などに関係しグラフ特性における次数、サイクル階数に影響される。地下街路構造を熟知している利用者にとっては多岐に選択できる経路選択から次数の高い点とサイクル辺のあるサイクル主体型に利便性があり、熟知していない利用者にとっては単純構造のツリー主体型に利便性がある。
- (3) 商業性：商業性は地下街事業者および出店経営者にとっての経営戦略上の評価で、商業地規模・集積性、回遊性・到達性、明瞭性・意外性などに関係する。商業地規模・集積性は地下街への吸引力であり店舗面積の規模、通路長（辺）、出入り口（次数1の点）に影響されると考える。また、回遊性・到達性は地下街に利用者を長く滞在・巡り歩ける度合いとして評価され、オイラーの小道、ハミルトンサイクルに影響されると考える。明瞭性・意外性は店舗の見栄えや遊び心を引き出すもので、地下街の複雑さなど迷路性を持った環境の魅力をグラフ理論特性に加えて地下街路景観の様々な変化に影響されると考える。

7. 結論

本論は、グラフ理論を地下街路に適用し、そのグラフ形態による分類化とその特性を明らかにすることを目的とした。その結果、地下街路グラフ形態はクラスター分析と調整算差の有意性から、①シンプル・ツリー、②フォレスト・ツリー、③放射サイクル、④閉鎖サイクルに分類でき、その特徴は“次数”、“橋”、“サイクル階数”に代表されるグラフ理論特性によって表れることが明らかになった。また、地下街路の安全性、利便性、商業性の評価への適用を考察し、今後の発展性として提示した。

(※) 補 注 (適応したグラフ理論特性)

- (1) グラフ (graph) : いくつかの点 (vertex) と点とを結ぶ辺 (edge) から成り立つもの
- (2) 連結グラフ (connected graph) : すべての点が点と弧によって連結されている
- (3) サイクル (cycle) : 連結して出発点に戻ってくる道
- (4) 木 (tree) : サイクルのない連結グラフ、多重辺が存在しない、任意の点の対を連結する一意的な道が存在、「 n 個の点を持つ木は $n - 1$ 個の辺を持つ」
- (5) 完全グラフ (complete graph) : 点のどの対もひとつの辺で連結されている
- (6) 平面的グラフ (planar graph) : 辺が頂点 (点) 以外に交点 (共通点) を持たないように平面で描けるグラフ、「グラフが平面的であるためには、その内部に 5 角形グラフ、6 角形グラフに縮約できるグラフを含まない場合」
- (7) 多角形グラフ (polygonal graph) : 平面グラフの辺が隣接する多角形の集合を形成し、分割している
- (8) 点の次数 (degree) : 点に接続される辺の数、「奇数次数の点の個数は偶数」
- (9) 次数 r の正則 (regular of degree r) : 点の次数がすべて同じ場合
- (10) サイクル辺 (cycle edge) : グラフにおいて橋でない辺
- (11) 橋 (bridge) : ある辺を通る以外双方の点に至ることができない辺、グラフを二つの集合に分ける
- (12) 道 (path) : 同じ点を 1 度だけ通る道筋
- (13) 小道 (trail) : 同じ辺を 1 度だけ通る道筋、「 $2k$ 個の奇数次数の点をもつグラフは k 個の小道を有す」
- (14) オイラーの小道 (Eulerian trail) : あらゆる辺を 1 度だけ通る巡回的な小道、「すべての次数が偶数」
- (15) ハミルトンサイクル (Hamiltonian cycle) : あらゆる点を 1 度だけ通るサイクル、法則なし
- (16) マッチング (matching) : おのおのの点を隣接する辺と対にすること
- (17) サイクル階数 (cycle rank) : サイクルをなくしてツリーにするために除去した辺の数
- (18) 面 (face) : 最小サイクルが囲む部分
- (19) 循環的な交代道 (circular alternation path) : 点の関係の必然性から始点と 点がつながること「任意の循環的な交代道において辺の数は 4 で割り切れる」

参考文献

- 1) Oystein Ore and Robin J. Wilson : やさしくくわしいグラフ理論入門 (大石泰彦訳), 日本評論社, 1993.7
- 2) エンジニアリング振興協会 地下開発利用研究センター : 1997 年度地下利用推進部会 報告書 第三部 地下空間利用の調査と整理, pp. III-1 ~ III-17, 1998.3
- 3) 浮田典良・森三紀 : 地図表現入門—主題図作成の原理と実際—, 大明堂, 1988.7
- 4) 関口 佳司・北村 真一 : グラフ理論の地下街路空間への適用に関する研究, 土木年次学術講演会 講演集共通セッション, pp. 294 ~ 295, 1998.10
- 5) 菅 民郎 : 多変量解析の実践 (上), 現代数学社, 1998.2
- 6) 渡辺 洋 : 心理・教育のための多変量解析法入門, 福村出版, 1997.3
- 7) 菅 民郎 : アンケートデータの分析, 現代数学社, 1998.12
- 8) 前掲 1)