原著論文

街路景観評価に対する影響要因の探索：成都市における街路景観の認知構造に関する研究 その2

楊 鶴*, 李 力*, 下川 敏雄**, 北村 眞一**

* 山梨大学大学院医学工学総合教育部, ** 山梨大学大学院医学工学総合研究部

Exploration of Factors Influencing on Evaluation of Streetscape: A Study on Cognitive Structure of Streetscape in Chengdu: Part 2

YAN Kun*, LI Li*, Toshio SHIMOKAWA** and Shinichi KITAMURA**

* Department of education, Interdisciplinary Graduate School of Medicine and Engineering, University of Yamanashi, 4-3-11 Takeda, Kofu-shi, Yamanashi 400-8511, Japan

** Department of research, Interdisciplinary Graduate School of Medicine and Engineering, University of Yamanashi, 4-3-11 Takeda, Kofu-shi, Yamanashi 400-8511, Japan

Abstract : In recent years, China has accomplished remarkable development. On the other hand, China has the problem that the traffic infrastructure has not caught up with economic development. In the maintenance of traffic infrastructure, it is important to perform development not only for convenience but also suitable to landscape. In this paper, especially we focused on the street landscape in the traffic infrastructure. And we investigated 32 graduate students of Southwest Jiaotong University to get the degree of satisfaction of the street landscape in Chengdu China. In the investigation, we evaluated the degree of satisfaction of the street landscape from “comfort” and “activity” these two factors by using five-stage method on 120 sheets of pictures. Moreover, the physical characteristic of these pictures was investigated. We searched for the physical factor which affects the degree of satisfaction of a street landscape by multivariate adaptive regression spline (MARS).

Keywords : cognition, regression, multivariate regression adaptive spine, streetscape, variable importance

1. 序

都市は経済成長による人口増加や交通需要増を予測し、必要な交通と生産生活基盤の整備を計画的に進める。特に生活や生産と密接に関わる交通基盤としての道路は機能面と環境面の両面のバランスのとれた整備が重要である。近年高度成長を迎えつつあるアジア諸国において、都市の基盤整備は急速に進んでおり、特に中国の大都市における経済成長と国土の基盤整備の速度は目を見張るものがある。自動車の保有率は急速に上昇し、都市街路は歩行者と自転車に加え、電動バイクが増加し、今は自動車が主流になった。そのため、自動車交通にあわせて街路の車道の改良が進むが歩行者空間は取り残されがちである。しかし都市街路は、長期的には都市の財産に成り得ることを鑑みると、量的整備（効率重視）と併せて質的整備（景観重視）が行われることが重要である。つまり街路の景観の評価とその物理的影響要因の分析により効果的な操作要因を明らかにし、街路の質的整備にとって有用な情報を得ることが研究課題である。既に日本及び欧米での研究実績はあるが、その結果を制度や経済状況の異なるアジア諸国への適用が可能であるか、また新たな手法の適用によって有効な結果が導き出せるかという課題が残されている。

前回の論文（楊他[1]）の目標は、街路景観の類型化（クラスター構造）に影響を及ぼす物理的な要因を探索することに

あった。そのため、街路景観の空間的な特性と「快適さ」および「賑やかさ」の直接的な関係は議論されなかった。これに対して、本論文の目標は、「快適さ」および「賑やかさ」に影響を及ぼす空間的な要因構造を探索することにある。このことは、快適で、かつ賑やかな街路の創造に繋がることが期待できる。

通常、このような解析には、重回帰モデルが頻用されるが、空間的な要因構造が単純な線形構造をもつとは考えにくい。また、真のモデル構造が交互作用を伴うことも考えられる。下川他[2]、河川景観評価に対して、アンサンブル学習法の一つである、多重加法型回帰樹木（MART：Multiple Additive Regression Trees）法[3]を用い、河川景観に対する「安らぎ」に影響を及ぼす要因の探索を行っている。

回帰分析の目的は、（1）応答の予測確度の向上、（2）応答に対する説明変数の要因構造の探索にある。下川他[1]は、MART法による河川景観評価では、目的（1）に重点をおく一方で、推定されたモデルがブラック・ボックス化されるため、目的（2）に対して、十分に配慮されていないことを指摘している。他方、本研究の目的に留意すると、目的（2）を犠牲にすることは、適切でないと考えられる。そのため、本研究では、目的（2）に重点をおきながら、十分な目的（2）を担保できる方法として、多変量適応型回帰スプライン（MARS：Multivariate Adaptive Regression Splines）法[4]を用いる。

本論文の構成は次の通りである。2節では、既存の景観評価に対する研究を概説する。3節では、成都市の概要について触れる。4節では、街路景観の評価実験の概要について述べる。5節では、MARS法による成都市の街路景観に対する空間的要因構造の探索を行う。6節では、5節で得られた二三の生産的知見を述べて結びに代える。さらに、補遺では、本論文で用いた、MARS法の概要について簡単に触れる。

2. 既存研究

2.1 景観評価に対する既存研究

天野他[5]は街路景観のSD法に主成分分析を適用し総合評価、活動性、親近性の評価軸を抽出した。さらに物理的特性で心理的効果を北村[6]は数量化理論I類を用いて街路景観の評価への影響要因として、断面形態(建物高、幅員)、線形形態(奥行き)、構成概念(色彩や素材の多様性)、要素の質と量(路面、広告、自然)、動的要素(車両・歩行者量)の影響を明らかにした。篠原他[7]は沿道の建物の高さの統一が景観評価へ及ぼす影響を明らかにした。船越他[8]は街路景観のSD法および因子分析の結果、デザイン、アーバンティなど13因子を抽出した。松本他[9]は街路景観のSD法および因子分析により、受動的力量性、伝統・乱雑性、活動性の3因子を抽出し、伝統・乱雑性の評価に対して要素の画像中の分布や面積率などによる影響を重回帰分析により明らかにした。植他[10, 11]は街路景観の分類実験から落ち着き、明るさ、スケール感の3因子を抽出し、景観の好ましさはまとまり・落ち着き、明るさ・面白みで説明できるとしている。また、総合的に街路景観評価方法の安定性や評価項目の影響を検討した。木多他[12]は街路景観の色彩の心的効果を分析し、連続する建築群の基調色と強調色のデザインと評価との関連を明らかにした。酒井他[13]は高木、低木、スカイラインの統一、看板の有無の相違が街路景観評価に与える影響をニューラル・ネットワーク、共分散構造モデルを用いて手法の比較を行った。

これに対して、中村他[14]は街路景観評価に影響する要因として、沿道の土地利用、沿道建築の統一、広告物の整理や電線電柱の地中化による錯綜性の低下、柵・車止め等付属物のデザイン、街路樹や花壇の育成による快適性の向上などの影響が大きいとされ、そうした要因の設計および提案がなされている。しかし中国の街路景観では、街路景観の分析研究はされておらず、街路整備規準、高密度居住、舗装材料と維持管理、歩道占有物、沿道土地利用は大きく異なり、街路景観評価の影響要因の強度も異なる可能性がある。

また、上記のなかで外的基準がある場合の統計的方法には、線形回帰モデルが頻用されている。ただし、要因構造が単純な線形で与えられることは少ないように思える。

他方、今村他[15]は、「賑やかさ」および「落ち着き(快適さ)」に対する影響評価にCART法[16]を用いている。そこでは、看板量が都市景観に多分に影響を与えており、とくに、看板量が少ない場合に、「落ち着き」が生じることを

指摘している。ただし、CART法の主たる目標は、類似した応答をもつ個体の部分集合を説明変数に基づいて分類しているに過ぎない。他方、本論文で用いる、MARS法では、非線形でかつ交互作用をもつ要因構造(回帰構造)を打ち切りベキ乗基底関数のもとで近似することができる。また、結果(推定モデル)が明示できることから、解釈も比較的容易である。

2.2 成都市に対する街路景観の既存の知見

楊他[1]は、成都市の街路景観に対する分類と空間的要因の関係を明らかにするために、多変量回帰樹木法[17]を用いている。その結果、歩道幅、商店および道路舗装による影響が強いことを指摘されている。また、そこで得られたクラスター内での「快適さ」および「賑やかさ」を副次的に考察している。そして、道路幅が狭く、商店があり、かつ道路舗装が悪いクラスターでは、街路景観に対する「快適さ」が低く、他方、歩道が広いものの、商店が少ないクラスターでは「賑やかさ」が低いことを報告している。ただし、これらの解釈は、街路景観の分類により与えられたクラスターに基づいて与えられており、直接的に、「快適さ」あるいは「賑やかさ」に対する要因構造を探索しているわけではない。

3. 成都市の概要

成都市は、中華人民共和国(以下、中国)四川省の省都である。中国南西部の肥沃な成都平原のなかにあり、古くから「天府の国」と呼ばれている。三国時代には、蜀の都として発展したことでも有名であり、都江堰を初めとした多くの世界遺産が存在する。人口は、2006年度において、1059.7万人であり、第3環状道路内の都市部での人口は、601.56万人である。また、チベットなどからの人口の流入に伴い、増加傾向にある。

中国における他の都市と同様に、急激な経済発展に伴う自家用車の所有率の増加が著しく、市街地での交通インフラが経済発展に追い付いていない状況が続いている。現在、地下鉄などの交通網の整備が急ピッチで進んでおり、また、成都市南部には、新市街地が建設中である(楊他[1])。

4. 実験の概要

本実験の目標は、中国四川省成都市における、街路景観に対する「快適さ」および「賑やかさ」に影響を与える空間的要因の構造を探索することである。

街路景観の評価尺度としては、多次元形容詞対を用いたSD法と因子分析の研究が多数あり、研究者や地域や被験者により解釈や命名方法、因子と形容詞対の関係も異なるが、共通して代表的な形容詞対と評価尺度も見られる。代表的な共通の評価尺度として、総合評価(快・不快、美・醜、善・悪、好・悪、調和、統一、満足など)、力量性(圧迫・開放など)、活動性(賑・寂、動・静、活発、明・暗、落ち着き

など), 親密性・親近性 (なじみやすさ, 身近さ, 人間的など), 空間性 (広・狭, 大・小など) が挙げられる [18]. 特に中国の街路景観評価では, 歩きやすさや居心地の良さの総合評価の「快適さ」, 広く商店が分布することによる活動性の「賑やかさ」に特色が見られることから評価尺度として注目される. 一方, 親密性・親近性は体験や慣れなど被験者と場所の関わりの影響を受けるため, 広域的な街路景観を対象とする場合はあまり適当とはいえない. また空間性としての場所の広さを写真プリントやスライド画像からは感じ取りにくい. そこで本研究では, 「快適さ」と「賑やかさ」を評価尺度として取り上げることとした.

本研究では, 成都市における街路景観の「快適さ」と「賑やかさ」に影響を与える要因を探索するために, 市内の様々な地点において写真を撮影した. このとき, 撮影には, 1200万画素の一眼レフカメラを用い, 天気, 時間帯の影響を回避するために, 日中 (11時から15時程度) の晴れの日

- (a) すべての画像は, 第2環状道路の内部に限定する.
- (b) 第2環状道路の内部は, 南北道路と東西道路により4個の区画に分類する. そして, それぞれの区画で30地点を撮影する.
- (c) それぞれの区画において, 幹線道路, 次幹道路そして支路の3種類の街路に分け, それぞれの街路で10地点を撮影する.

120枚の評価画像に対しては, 以下の18項目の空間的要因を調査した: (1) 道路の幅 (m) (道幅), (2) 歩道の幅 (m) (歩道幅), (3) 画像に写っている建物の棟数 (建築物棟数), (4) 画像に写っている高層建築物 (7階以上の建築物) の有無 (建築物 (高) の有無), (5) 画像に写っている低層建築物 (7階未満の建築物) の有無 (建築物 (低) の有無), (6) 街路樹における灌木 (1m未満の街路樹) の高さ (m) (街路樹の高さ (灌木)), (7) 街路樹における高木 (1m以上の街路樹) の高さ (m) (街路樹の高さ (高木)), (8) 商店の有無, (9) 画像に写っている広告看板の個数 (広告看板数), (10)

図1 撮影地点の例示 (詳細な説明は楊他 [1] を参照)

画像内における広告看板の面積の割合 (%) (広告看板占拠率), (11) 画像に写っている道路舗装の良悪 (道路舗装良悪), (12) 電柱の有無 (0:無, 1:有), (13) 街灯の有無, (14) 案内標識の有無, (15) 画像内の街路樹の多少 (街路樹の多少), (16) ゴミ箱の有無, (17) 画像に写っているベンチの数 (ベンチ数), (18) 画像内におけるベンチの面積の割合 (%) (ベンチ占拠率). 因みに, 中国では, 7階以上の建築物にはエレベータの設置が義務付けられているため, それを建物の基準にした. また, 灌木は, 標準的な成人の目線の高さが1.2mであることから, 1mを基準にした.

それぞれの画像は, 西南交通大学 大学院生34名に対して, 「画像を見て安らげるか否か」 (快適さ) および「賑やかで活気があるか否か」 (賑やかさ) に対して, 5段階評価で採点してもらった (1: そう思わない, 2: ややそう思わない, 3: どちらでもない, 4: ややそう思う, 5: そう思う). 被験者は, いずれも成都市に2年以上在住する学生に限定したうえで, アンケートの目標を伏せたうえで上記の質問を行った. それぞれの画像に対する「快適さ」および「賑やかさ」に対する認知的評価得点は, 34名の被験者の得点の平均値により与えることとした. このとき, 図2は, 「快適さ」および「賑やかさ」が良好・不良だった街路景観画像の例を表している.

5. 多変量適応型回帰スプライン法による影響要因の探索

5.1 データ省察

表1は, 120枚の画像に対する, 道路別および全体での平均値 (計量値の場合) あるいは個体数 (計数値の場合) および, p 値 (計量値の場合には1元配置ANOVA, 計数値の場合にはカイ2乗検定) を表している. 「道幅」, 「街路樹の高さ (灌木)」での道路別の平均値は, 幹線道路>次幹道路>支路となっており, 有意差が認められた. 同様の傾向は, 建築物 (高) の有無でもみられた. 幹線道路は, 一般に車線数が多く, かつ, 高層建造物が多いことは平易に理解できる. 本データでは, 街路に灌木がない場合には, 0としているため, このことが結果に影響を及ぼしたと推察される.

	快適性 (良)	快適性 (悪)
賑やかさ (良)		
賑やかさ (悪)		

図2 撮影した画像の例示

表1 道路別での空間的要因に対するデータ省察の結果 (■のセルは計量値であり, ■のセルは計数値である. また, p 値は, 計量値の場合には一元配置ANOVAを用いており, 計数値の場合には, カイ2乗検定を用いている)

		平均 (計量値) or 個体数 (計数値)				p 値
		幹線道路	次幹道路	支路	全体	
道幅(m)		47.042	35.446	22.984	35.157	<0.001***
歩道幅(m)		4.915	5.239	4.893	5.016	0.839
建築物棟数		2.600	2.275	2.325	2.400	0.491
建築物(高)の有無	有	28	20	11	59	<0.001***
	無	12	20	29	61	
建築物(低)の有無	有	28	36	36	100	0.021*
	無	12	4	4	20	
街路樹の高さ(灌木)(m)		0.248	0.150	0.085	0.161	0.477*
街路樹の高さ(高木)(m)		7.790	8.235	7.805	7.943	0.726
商店の有無	有	23	28	22	73	0.338
	無	17	12	18	47	
広告看板数		0.900	0.900	0.275	0.692	0.026*
広告看板占拠率(%)		1.950	2.450	0.425	1.608	0.149
道路舗装良悪	良	24	26	23	73	0.783
	悪	16	14	17	47	
電柱の有無	有	14	13	13	40	0.963
	無	26	27	27	80	
街灯の有無	有	31	36	26	93	0.028*
	無	9	4	14	27	
案内標識の有無	有	15	13	8	36	0.213
	無	25	27	32	84	
街路樹多少	多	20	20	19	59	0.967
	少	20	20	21	61	
ゴミ箱の有無	有	3	8	9	20	0.156
	無	37	32	31	100	
ベンチ数		0.400	0.050	0.325	0.258	0.269
ベンチ占拠率(%)		0.750	0.250	0.513	0.504	0.583

実際に, 幹線道路, 次幹道路, 支路での灌木の存在確率は, それぞれ, 45.0(%), 25.(%), および12.5(%) だった. そのため, 街路樹の灌木が高くなる傾向にあるというよりも, むしろ, 支路での灌木の存在確率が小さいと捉えたほうが良い. 他方, 高木に同様の傾向が認められないのは, 成都市の街路樹は総じて高いためであると推察される.

また, 「広告看板数」および「街灯の有無」は, 支路で極端に少なく有意差が認められた. 広告看板が支路に少ないのは, 平易に理解できる. また, 成都市では, 道幅の広い道路の車道を照らす大きな街灯が数多く存在する一方で, 道幅の狭い道路では, そのような車道灯が少ないため, このことが寄与したと思われる.

表2は, 「快適さ」と「賑やかさ」に関する34名の被験者の評価に対する要約統計量を表している. 「快適さ」での平均値

は, ほぼ同一であり, 一元配置ANOVAでも有意差が認められなかった. 他方, 「賑やかさ」は, 支路の平均値が, 幹線道路および次幹道路に比べて0.50以上低く, 有意差が認められた.

5.2 多変量適応型回帰スプライン (MARS) 法の適用

5.2.1 MARSモデルの推定

本節では, 「快適さ」および「賑やかさ」に影響を及ぼす要因およびその影響の形式 (要因構造) を探索する. 空間的要因 (説明変数) には, 表1で示した, 以下の18個の変数を用いる: x_1 : 道幅, x_2 : 歩道幅, x_3 : 建築物棟数, x_4 : 建築物(高)の有無 (0: 無, 1: 有), x_5 : 建築物(低)の有無 (0: 無, 1: 有), x_6 : 街路樹の高さ(灌木), x_7 : 街路樹の高さ(高木), x_8 : 商店の有無 (0: 無, 1: 有), x_9 : 広告看板数, x_{10} : 広告看板占拠率, x_{11} : 道路舗装良悪 (0: 悪, 1: 良), x_{12} : 電柱の有無 (0: 無, 1: 有), x_{13} : 街灯の有無 (0: 無, 1: 有), x_{14} : 案内標識の有無 (0: 無, 1: 有), x_{15} : 街路樹の多少 (0: 少, 1: 多), x_{16} : ゴミ箱の有無 (0: 無, 1: 有), x_{17} : ベンチ数, x_{18} : ベンチ占拠率.

通常, 影響要因の探索には, 重回帰分析 (およびステップワイズ法) が頻用されている. ただし, 実際には, 要因が単純な線形構造を示すことは滅多にない. 今村他 [15] は, 景観イメージに対する物理的要因の探索に, 回帰樹木 (CART: Classification And Regression Tree) 法 [16] を用

表2 「快適さ」および「賑やかさ」に対する要約統計量 (p 値は, 一元配置ANOVAより算出している)

	平均値 (標準偏差)	
	快適さ	賑やかさ
幹線道路	3.09 (0.58)	3.30 (0.69)
次幹道路	2.99 (0.69)	3.20 (0.74)
支路	3.08 (0.79)	2.63 (0.68)
全体	3.05 (0.69)	3.04 (0.76)
p 値	0.796	<0.001***

いている。ただし、回帰樹木法の予測精度は高くないことは、広く知られており、重回帰分析を下回ることが少なくない。予測精度を向上させるだけであれば、多重加法型回帰樹木（MART：Multiple Additive Regression Trees）法[3]などのアンサンブル学習法を適用することが考えられる。しかしながら、回帰分析の目標（予測および要因構造の探索）を考えると、本論文では、許容範囲内の予測精度を保持したもとの、要因構造を明らかにするほうが適切である。すなわち、予測（推定回帰）モデルをブラック・ボックス化するアンサンブル学習法の適用は適切でない。そのため、本論文では、多変量適応型回帰スプライン（MARS：Multivariate Adaptive Regression Splines）法[4]を用いる。MARS法は、CART法のステップ関数近似を打ち切りベキ乗基底関数に変更した方法であり、比較的良好な予測性能をもちながら、推定モデルを解釈できる（MARS法の略説は補遺で触れる）。

MARS法では、交互作用の最大次数を事前に設定しなければならない。本論文では、最大次数を1（加法モデル）、2、3、4、5としたもとの、それぞれに対してMARSモデルを推定し、そのもとの、残差の一般化交差確認推定値（GCV）が低く、かつ、モデル内の基底関数の個数が最も小さい推定MARSモデルを採用した。これは、解釈可能な範囲に留意したためである。表3は、最大次数に対する、GCVとパラメータ数の関係を表している。いずれの場合においても、3次以上での推定MARSモデルに変化がなかった。「快適さ」では、次数が2の場合に、GCVおよびパラメータ数が最小だった。そのため、2次での推定MARSモデルを採用した。「賑やかさ」では、最大次数が2の場合に、GCVが最小だったものの、パラメータ数が14個存在し、煩雑なモデルを構成した。他方、最大次数が3の場合には、GCVが最大次数が2の場合に比べて僅かに劣るものの、パラメータ数が7個であることから、3次での推定MARSモデルを採用した。

その結果、「快適さ」に対する推定MARSモデルは

$$\begin{aligned} \hat{y} = & 3.144 - 0.026 \cdot (50.8 - x_1)_+ - 0.371 \cdot I(x_{12} \in 1) \\ & + 0.622 \cdot I(x_{15} \in 1) + 0.041 \cdot I(x_{11} \in 1) \cdot (41.5 - x_1)_+ \\ & + 0.095 \cdot I(x_{11} \in 1) \cdot (x_2 - 4.5)_+ \\ & - 0.445 \cdot I(x_8 \in 1) \cdot I(x_{15} \in 1) \\ & - 17.663 \cdot x_{10} \cdot I(x_{12} \in 1) \cdot (x_3 - 2)_+ \end{aligned} \quad (1)$$

で与えられた。ここに、 $(x - c)_+$ は、括弧内が正値ならば $x - c$ 、負値ならば0を返す関数であり、 $I(\bullet)$ は、括弧内が正値ならば1、負値ならば0を返す符号関数である。その結果、

表3 MARSモデルにおける次数の選定（■は選定された次数である。個数はパラメータ数を表している）。

		快適さ		賑やかさ	
		GCV	個数	GCV	個数
次数	1	0.451	8	0.290	11
	2	0.443	6	0.240	14
	3	0.463	8	0.242	7
	4	0.463	8	0.242	7
	5	0.463	8	0.242	7

「道幅」「歩道幅」「建築物棟数」「商店の有無」「広告看板占拠率」「道路舗装良悪」「電柱の有無」「街路樹の多少」の8個の変数がモデルに含まれた。このとき、GCV寄与率（残差平方和の一般化交差確認推定値に基づく寄与率）が63.3%であり、回帰モデルの有意性に対するF検定のp値は0.001を下回り、有意だった。因に、ステップワイズ法に基づく重回帰分析での自由度調整済み寄与率が44.8%であることから、約20%の寄与率の上昇が認められた。

同様に、「賑やかさでは」

$$\begin{aligned} \hat{y} = & 3.359 - 0.014 \cdot (50.8 - x_1)_+ - 0.286 \cdot (3 - x_3)_+ \\ & + 1.065 \cdot I(x_8 \in 1) + 6.227 \cdot (x_{10} - 0.02)_+ \\ & - 11.874 \cdot (3.6 - x_2)_+ \cdot (0.02 - x_{10})_+ \\ & - 0.239 \cdot I(x_8 \in 1) \cdot (x_3 - 2) \\ & - 1.282 \cdot (x_8 \in 1) \cdot (0.6 - x_6) \end{aligned} \quad (2)$$

だった。その結果、「道幅」「歩道幅」「建築物棟数」「街路樹の高さ（灌木）」「商店の有無」「広告看板占拠率」の6個の変数がモデルに含まれた。このとき、GCV寄与率が44.8%であり、回帰モデルの有意性に対するF検定のp値は0.001を下回り、有意だった。因に、ステップワイズ法に基づく重回帰分析での自由度調整済み寄与率が25.2%であることから、「快適さ」の場合と同様に、約20%の寄与率の上昇が認められた。

その結果、いずれの推定MARSモデルでも、「道幅」「歩道幅」「建築物棟数」「商店の有無」「広告看板占拠率」が含まれた。とくに、道幅は、道路別で有意差が認められたことから、以降の解析において、注視する必要がある。

5.2.2 推定されたMARSモデルの視覚化とその解釈

式（1）および（2）では、煩雑な結果を示している。他方、MARS法がCART法の発展形であることから、これらの推定式（推定MARSモデル）は、デンドログラムにより図示することができる。

図3は、「快適さ」に対する推定MARSモデル（式（1））に対するデンドログラム表示である。切片が、3.144であることから、平均値（表2）よりも、若干高いことが示唆された。このデンドログラムでは、例えば、図3の-0.026の四角形では、道幅が50.8以下の場合に、 $-0.026 \times (50.8 - \text{道幅})$ の関数が付与される（すなわち、快適さが減少する）ことを意味する。また、直線で結ばれた四角形は、交互作用を意味しており、例えば、0.095の四角形では、 $0.095 \times I(\text{道路舗装} = \text{良}) \times (\text{道路幅} - 4.5)$ の交互作用を意味する。すなわち、四角形のなかに回帰係数が書かれている四角形のそれぞれが、式（1）あるいは式（2）の基底関数を意味している。また、デンドログラムより、以下のことが分かった：

- Y1) 道幅が50.8未満の場合に、「快適さ」が減少する（ $\beta_1 = -0.026$ ）。
- Y2) 電柱が存在する場合に、「快適さ」が減少する（ $\beta_2 = -0.371$ ）。
- Y3) 電柱があり、かつ建築物棟数が2を上回る場合に、広告看板占拠率×建築物棟数での2次交互作用での

- 「快適さ」の減少傾向が認められる ($\beta_3 = -17.663$).
- Y4) 街路樹が多い場合には、「快適さ」が増加する ($\beta_4 = 0.622$).
- Y5) 道路舗装が良好であり、かつ歩道幅が4.5以上の場合には、「快適さ」が上昇する ($\beta_5 = 0.095$).
- Y6) 道路舗装が良好であり、かつ歩道幅が41.5未満の場合には、「快適さ」が上昇する。ただし、ルールY1があることから、道路舗装が良好であれば、道幅の狭さによる減少量が緩和されると解釈するほうが妥当である。このことは、後述の部分従属プロットでも示唆されている ($\beta_6 = 0.041$).

- Y7) 商店が存在し、かつ街路樹が多い場合には「快適さ」が減少する。ただし、ルールY3が存在することから、街路樹が多くても、商店が存在すれば、「快適さ」の増加量が減少すると解釈するほうが妥当である ($\beta_7 = -0.445$).

図4は、「賑やかさ」に対する推定MARSモデル(式(1))に対するデンドログラム表示である。切片が、3.560であることから、平均値(表2)よりも、高いことが示唆される。また、デンドログラムより、以下のことが分かる：

- N1) 道幅が50.8未満を下回る場合に、「賑やかさ」が減少する ($\beta_1 = -0.014$).

図3 「快適さ」に対するMARSモデルのデンドログラム（ここで、四角形内の数字は回帰係数であり、点線の括弧は、回帰係数が含まれなかった（すなわち打ち切りベキ乗基底関数が含まれない）ことを表している）

図4 「賑やかさ」に対するMARSモデルのデンドログラム（ここで、四角形内の数字は回帰係数であり、点線の括弧は、回帰係数が含まれなかった（すなわち打ち切りベキ乗基底関数が含まれない）ことを表している）

- N2) 建築物棟数が3未満の場合に、「賑やかさ」が減少する ($\beta_2 = -0.286$).
- N3) 商店が存在する場合には、「賑やかさ」が増加する ($\beta_3 = 1.065$).
- N4) 商店が存在し、かつ建築物棟数が2を上回る場合には、「賑やかさ」が減少する ($\beta_3 = -0.239$).
- N5) 商店が存在し、かつ街路樹の高さ(灌木)が0.6未満では、「賑やかさ」が減少する ($\beta_4 = -1.282$).
- N6) 広告看板占拠率が0.02を上回る場合には、「賑やかさ」が増加する ($\beta_5 = 6.227$).
- N7) 広告看板占拠率が0.02を下回り、かつ歩道幅が3.6未満の場合には、「賑やかさ」が減少する ($\beta_6 = -11.84$).

5.2.3 空間的要因の影響力の評価

前節では、図3、4に基づき、推定MARSモデルに関して解釈した。ただし、式(1)および式(2)でもわかるように、MARS法では、複数の項に同じ空間的要因が存在することから、個々の説明変数毎の応答(快適性、賑やかさ)に対する影響の大きさを評価することは困難である。そのため、本論文では、変数重要度により、個々の説明変数の応答に対する評価を行う。変数重要度とは、Breiman et al. [16]によって提案された統計量であり、応答に対して、個々の説明変数にどの程度の影響を与えているかを、最大の影響力をもつ説明変数を100(%)としたときの相対測度として表したものである。詳しくは、補遺で触れている。

図5は、「快適さ」に対する推定MARSモデルの変数重要度である。「電柱の有無」での変数重要度が最も高く、次いで、

図5 「快適さ」に対する推定MARSモデルの変数重要度
(応答に対して最も影響を及ぼす要因を100としたときの相対値)

「道路舗装の良悪」「街路樹の多少」の順で影響の大きさが高かった。これらの変数の変数重要度は、おおよそ50%を超えていた。図6は、「賑やかさ」に対する推定MARSモデルの変数重要度である。「道幅」での変数重要度が最も高く、次いで、「広告看板比率」「商店」の順で影響していた。表2において、主幹道路、次幹道路、支路の順で道幅が有意に狭くなる傾向を示したが、このことが、「賑やかさ」に強い影響を及ぼしていたと考えられる。また、今村 [15] では、「広告看板」が都市景観の「賑やかさ」に強い影響を及ぼしていることが示唆されているが、本解析では、このことを裏付ける結果を示した。したがって、広告看板の影響は、日本でも中国でも大差がなさそうである。

5.2.4 個々の空間的要因による応答(快適性、賑やかさ)への影響評価

図5、6では、応答に対する説明変数の影響の大きさを診断した。ここでは、部分従属度 [3] を用いて、説明変数の変動に対する応答(快適性、賑やかさ)に対する影響の大きさを診断する。

図7は、「快適さ」に対する部分従属度である。「電柱の有無」(図7(a))では、電柱が存在しないほうが、存在する場合に比べて、0.6程度の「快適さ」の上昇が認められた。同様に、道路舗装が良好なほうが、悪い場合に比べて、0.5程度の「快適さ」の上昇が認められた(図7(b))。「街路樹の多少」では、街路樹が多いほうが少ない場合に比べて、0.25程度の上昇が認められた(図7(c))。「広告看板比率」あるいは「建築物棟数」では、数値が上昇するほど、「快適さ」

図5 「賑やかさ」に対する推定MARSモデルの変数重要度
(応答に対して最も影響を及ぼす要因を100としたときの相対値)

図7 「快適さ」に対する部分従属度 (X軸が説明変数、Y軸が部分従属度を表している。また、表上部の説明変数の説明のなかの括弧内は変数重要度である。さらに、折れ線グラフのラグ (X軸上の赤色の印) は個体 (画像) である)

が減少した (図7 (d), (f))。一方で、道幅および歩道幅では、広くなるにつれて、「快適さ」の上昇傾向が認められた (図7 (e), (g))。このとき、道幅に比べて、歩道幅での「快適さ」の上昇量が大きかった。商店の有無では、商店が存在しないほうが存在する場合に比べて、僅かに「快適さ」が高かった。

図8は、「賑やかさ」に対する部分従属度の結果である。「道幅」が増加するほど、「賑やかさ」が増加傾向を示したが、50.8において、その傾向変化が飽和した (図8 (a))。これは、式 (1) における、第2項の主効果に依る影響であることが推察される。「歩道幅」でも、広くなるほど、「賑やかさ」が増加した (図7 (f))。「広告看板占拠率」では、線形関係が認められ、「広告看板占拠率」が上昇するほど、「賑やかさ」が増加した。「快適性」での部分従属度 (図7 (a)) において、「広告看板占拠率」の上昇が「快適さ」を減少させることが示唆されていることから、「広告看板占拠率」は、増加するほど、被験者に「賑やか」な印象を与え、減少するほど、「快適さ」を与えた。このような、「賑やかさ」と「快適さ」の相反傾向は、商店の有無でも示唆された (図8 (c))。「建築物棟数」では、棟数=5をピークに凸型の形状を示した。「建築物棟数」では、高層ビルから、小さな民家までが混在しており、このことが、このような形状を与えたと推察される。「街路樹の高さ (灌木)」では、街路樹が高くなるほど、「賑やかさ」が上昇した。

6. 結びに代えて

本節では、MARS法に基づいて、「快適さ」および「賑やかさ」の影響要因を探索した。以下では、得られた結果を要約する：

1. 街路樹が多いほど、快適さを感じる傾向が認められた。
2. 商店あるいは、広告看板の多い、商業地域では、賑やかさが増加する一方で、快適さが減少する傾向にあった。このような傾向は、今村他 [15] でも示唆されている。すなわち、日本でも中国においても、このような背反関係が存在することが解った。
3. 街路樹による「快適さ」への効果は、商店が存在する場合には、存在しない場合に比べて小さかった。
4. 道幅および歩道幅は、「快適さ」および「賑やかさ」に対して、ポジティブな影響を与えた。とくに、道幅は、「賑やかさ」に対して最も影響を与えることが示唆された。
5. 道路舗装が良好な街路景観のなかで、道路幅が広い街路は、道路舗装が悪い街路に比べて「快適さ」を上昇させる傾向にあった。この傾向は、楊他 [1] による、街路景観の主観的分類での指摘に類似した。すなわち、街路景観に対する分類プロセスとその嗜好の両方において、これらの要因が影響していることが示唆された。

図8 「快適さ」に対する部分従属性（X軸が説明変数，Y軸が部分従属性を表している．また，表上部の説明変数の説明のなかの括弧内は変数重要度である．さらに，折れ線グラフのラグ（X軸上の赤色の印）は個体（画像）である）

6. 電柱の有無が街路景観の「快適さ」に最も影響を与えた．そして，電柱が存在しないほうが，「快適さ」にポジティブな影響を与えることが示された．

補遺A：多変量適応型回帰スプライン法およびその診断

A.1 多変量適応型回帰スプライン法

多変量適応型回帰スプライン（MARS）法は，CART法の連続モデルへの拡張を動機として，Friedmanによって提案されたノンパラメトリック回帰手法である．MARS法の主要な目標は，データ集合 $\{(y_n, \mathbf{x}_n), n=1, \dots, N\}$ が与えられるときに，応答 y に対する説明変数 $\mathbf{x}$ の従属性をモデル化することである（杉本他 [19]）．

MARS法は，CART法での説明変数空間の再帰的な分割と説明変数空間に潜む交互作用を打ち切りベキ乗基底関数による予測モデルに組み込むことによって，強い予測力と柔軟性に富んだモデルを可能とする．

このとき，MARS法により得られる（推定）モデルは，

$$\begin{aligned}\hat{f}(x) &= \hat{\beta}_0 + \sum_{m=1}^M \hat{\beta}_m H_m(\mathbf{x}) \\ &= \hat{\beta}_0 + \sum_{m=1}^M \hat{\beta}_m \prod_{k=1}^{K_m} [i_{(k,m)}(x_{p(k,m)} - t_{(k,m)})]_+\end{aligned}$$

と書かれる．ここに， $H_m(\mathbf{x})$ は，括弧内が負値の場合には0，正值の場合には，括弧内の数値を返す． M は，MARSモデル

における打ち切りベキ乗基底関数の数であり， K_m は， m 番目の打ち切りベキ乗基底関数における次数である． $p(k,m)$ は， m 番目の打ち切りベキ乗基底関数の積因子番号 k に対応する説明変数のラベル， $t_{(k,m)}$ は， (k,m) に対応する区分点の値， $i_{(k,m)}$ は， (k,m) に対応する -1 か $+1$ の値である．さらに，パラメータ $\hat{\beta}_m$ の推定には，通常最小2乗法を用いることができる．

MARS法は，多数の基底関数を生成する前進ステップワイズ過程と，過剰に大きくしたモデルから適合性能に寄与しない打ち切りベキ乗基底関数を順に削除する後退ステップワイズ過程の2段階で遂行される．これにより，前進ステップワイズ過程で得られた推定MARSモデルから，Nullモデル（切片項のみのモデル）までのモデル系列を作成することができる．

MARS法では，モデル系列のなかから，最適なモデルを選定しなければならない．MARS法におけるモデル選択基準には，一般に，GCV（Generalized Cross-Validation：一般化交差確認法）の修正版

$$GCV(M) = N^{-1} \frac{\sum_{n=1}^N (y_n - \hat{y}_n^{(M)})^2}{(1 - M(\lambda + 1)/N)^2} \quad (3)$$

が用いられる．ここに， λ は最適化を図るパラメータであり，経験的に3が用いられることが多い．そして，上式が最小になるモデルが選定される．

A.2 変数重要度

利用者の最も関心のある問いの一つは、ある応答に対して各説明変数がどの程度の重要度をもつかである。樹木構造接近法は、魅力的な局所的あてはめを実現し、標本サイズ(N)よりも用いる説明変数の数(P)が多ような多変量データの場合でも適用できる長所をもつ。

ただし、得られたモデルが複雑になるほど、その解釈が困難になる。このような場合に有用な統計量が変数重要度である。

変数重要度は、得られたMARSモデルを通して、説明変数が応答に対してどの程度の影響を及ぼしているかを相対的に評価することができる(杉本他 [19])。

説明変数 x_p に関する情報の遮蔽に対して得られる最適なGCV評点(すなわち、説明変数 x_p を除いた場合の最適な推定MARSモデルでのGCV評点)を GCV_{p-} とする。そして、全データにおけるGCV評点を GCV_0 とする。このとき、変数重要度 $VI(p)$ は、

$$VI(p) = GCV_{p-} - GCV_0$$

で与えられる。実際には、すべての説明変数において、 $VI(p)$ を計算し、その最大値を分母とした相対的測度

$$RI(p) = 100 \times VI(p) / \max_p(VI(p))$$

によって与えられる。

A.3 部分従属度

部分従属度は、元来、アンサンブル学習法あるいはニューラルネットといった、推定されたモデルがブラック・ボックス化される手法において、その推定モデルの様相を捉えるためにFriedman [3] によって開発されている。そこでは、任意の説明変数に対する部分従属度の変動を座標軸上にプロットし、視覚的に表現することで、個々の説明変数の応答への影響を捉えることができる。

MARS法では、高次の交互作用を含んだ場合に、解釈が困難な場合がある。また、低次の交互作用しか含まない場合でも、説明変数に対する応答の挙動を省察することは、有用な示唆を与えることができる。

いま、全データ集合 $\{(y_n, \mathbf{x}_n)\}_{n=1}^N$ が与えられるとき、関心がある p^* 個の説明変数を $\mathbf{x}_s$ とし、それ以外を $\mathbf{x}_{s^c}$ とする。また、推定MARSモデルを $\hat{f}(x)$ とすると、部分従属度(の経験的推定値)は、

$$\tau_s(\mathbf{x}_s) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{f}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_{s,n}) \quad (4)$$

で与えられる。したがって、部分従属度は、 $\mathbf{x}_s$ を固定したもとの、 $\{\mathbf{x}_{s,n}\}_{n=1}^N$ の平均値である。

部分従属度のグラフィカル表現は、 $p^*=1,2$ の説明変数 $\mathbf{x}_s$ を逐次に動かしながら式(4)を計算し、データ点 $(\mathbf{x}_s, \tau_s(\mathbf{x}_s))$ を座標軸上にプロットすることで得られる。

参 考 文 献

- [1] 楊鵬, 李力, 下川敏雄, 北村眞一: 成都市における街路景観の認知構造に関する研究, 感性工学 第13回 大会特集号, in press.
- [2] 下川敏雄, 大山勲, 風間ふたば, 西山志保, 北村眞一: 2値応答に対する縮小推定型多重加法型回帰樹木の開発: 水道水満足度への応用, 感性工学, No.9, 4, pp.653-661, 2010.
- [3] Friedman, J.H.: Greedy function approximation: a gradient boosting machine, Annals of Statistics, 29, pp.1189-1232, 2001.
- [4] Friedman, J.H.: Multivariate adaptive regression splines (with discussion), Annals of Statistics, 19, 1, pp.1-67, 1991.
- [5] 天野光三・榊原和彦・藤墳忠司: 街路空間の心理的効果について, 道路, 420, pp.25-32, 1976.
- [6] 北村眞一: 街路の景観構成に関する基礎的研究, 都市計画別冊, 11, pp.169-174, 1976.
- [7] 篠原修・屋代雅充: 街路景観のまとまりに及ぼす沿道建物の効果に関する計量心理学的研究, 土木学会論文集, 353, IV2, pp.131-138, 1985.
- [8] 船越徹・積田洋: 街路空間における空間意識と空間構成要素との相関関係の分析(相関分析) - 街路空間の研究(その3) -, 日本建築学会計画系論文報告集, 387, pp.49-57, 1987.
- [9] 松本直司・寺西敦敏・仙田満: 街路景観の乱雑・整然性要因に関する研究 - 中心市街地における乱雑・整然性に関する研究その1 -, 日本建築学会計画系論文報告集, 440, pp.89-98, 1991.
- [10] 榎究・乾正雄・中村芳樹: 街路景観の評価方法の安定性, 日本建築学会計画系論文集, 458, pp.27-33, 1994.
- [11] 榎究・乾正雄・中村芳樹: 評価項目が街路景観評価に及ぼす影響, 日本建築学会計画系論文集, 468, pp.27-36, 1995.
- [12] 木多道宏・奥俊信・舟橋國男・鈴木毅・小浦久子: 街路景観における色彩の心理効果, 日本建築学会計画系論文報告集, 522, pp.239-246, 1999.
- [13] 酒井裕一・藤居良夫: 街路景観評価に対する分析手法の考察, ランドスケープ研究, 65, 5, pp.833-836, 2002.
- [14] 中村良夫, 篠原修, 安島博幸, 小柳武和, 笹谷康之, 青木英明, 窪田陽一, 松崎喬, 榊原和彦, 安藤昭, 齋藤潮, 中野恒明, 原田邦彦: 街路の景観設計, 技報堂出版, 1985.
- [15] 今村佳世, 長濱龍一郎, 西川浩也, 八嶺朝子, 後藤昌司: CARTによる景観イメージコンセプトと景観要素との関係抽出, 日本行動計量学会大会発表論文抄録集, 26, pp.371-372, 1998.
- [16] Breiman L., Friedman, J.H., Olshen, R.A. and Stone, C.J.: Classification and Regression Trees, Wadsworth, 1984.
- [17] De'ath G.: Multivariate regression trees: a new technique for constrained classification analysis. Ecology, 83(4), pp.1103-1117, 2002.

- [18] 篠原修：景観体験と景観の操作，土木工学大系13景観論，彰国社，pp.113-115，1977.
- [19] 杉本知之，下川敏雄，後藤昌司：樹木構造接近法と最近の発展．計算機統計学，計算機統計学，18，2，pp.123-164，2005.

楊 鵬（非会員）

2003年大阪産業大学大学院経営・流通学研究科流通システム専攻修士課程修了．現在中国西南交通大学交通運輸及び物流学院講師，および山梨大学大学院医学工学総合教育部環境社会創生工学専攻博士課程在学，修士（流通学）．この間，物流合理化と港湾整備，貿易及び交通施設計画，成都市街路景観分類などの研究を行い，鉄道環境評価，成都市濱江路景観設計などの計画設計の実務を行った．

李 力（非会員）

2010年中国西南交通大学大学院交通運輸計画及び管理学修了．現在山梨大学大学院医学工学総合教育部環境社会創生工学専攻（国際流域総合水管理特別コース）博士課程在学．交通運輸計画学および管理学修士．この間，都市間鉄道駅配置計画，物流計画，および日本の道路景観史，成都市の道路景観分類等に関する研究を行った．また海口市の工業鉄道など鉄道路線のフィージビリティ・スタディ・プロジェクトの実務を行った．

下川 敏雄（正会員）

2004年大阪大学大学院基礎工学研究科修了．大阪大学医学部附属病院未来医療センター特任研究員を経て，現在，山梨大学大学院医学工学総合研究部准教授．博士（工学）．この間，医学統計学，環境統計学，データマイニングに関する研究に従事．2002年～日本計算機統計学会広報委員，2004年～NPO法人臨床試験推進機構統計アドバイザー．

北村 眞一（非会員）

1979年東京工業大学大学院工学研究科修了．現在山梨大学大学院医学工学総合研究部教授．工学博士．この間，景観工学，地域・都市計画，観光計画，ビオトープ計画など調査・研究に従事．また，宮ヶ瀬ダム及沢ビオトープ設計，甲州市都市計画マスタープラン策定，山中湖村景観計画策定など，計画や設計を実践した．著書に「川は生きている－川の文化と科学，ウエッジ，2009」等がある．