40. 道路幅員の統計分布

-理論モデルによる推定とその精度-

Statistical Distribution of Road Width

-Estimation Based on Theoretical Model and Its Accuracy-

薄井 宏行*
Hiroyuki Usui*

Statistical distribution of road width is derived theoretically by arranging road segments composing road networks in ascending order of road width on one-dimensional space. It is found that average, maximum, minimum road width and the coefficient reflecting the composition ration of road width are the parameters which determine the distribution. By applying this statistical distribution model to actual road width distribution, it is found that, while, as a result of chi-square test, the actual statistical distribution of road width follows the theoretical distribution mentioned above statistically, their discrepancy are larger in the areas where road networks have been constructed based on urban planning than in the areas where they have not.

Keywords: road, width, statistical distribution, average road width
道路, 幅員, 統計分布, 平均道路幅員

1. はじめに

道路網は都市空間の骨格をなす主要な空間要素である。道路網の充実度を反映する主な指標として、道路率、道路延長密度、平均道路幅員がある。とくに、平均道路幅員は道路幅員の統計分布の主要な統計量であり、1)市街地の住環境を総体的に表す指標、2)住環境整備のための各種事業の採択要件¹⁾として用いられている。荒井(2001)が指摘するように、道路率は市街地の住環境を総体的に反映する指標として有効であり、適正な道路率は約15%から25%程度であるとされている²⁾。李ほか(1997)は、ある地域の基盤条件を反映する指標として道路率を用いている³⁾。地域における災害安全性を評価する際、道路率だけでなく、道路幅員の統計分布に着目することも有効である。阪神・淡路大震災では、幅員4m未満の道路の約73%、幅員4m以上6m未満の道路の約63%、幅員6m以上8m未満の道路の約33%において、沿道建物等の倒壊に伴う道路閉塞が発生し、発災後の避難活動や消火活動に支障をきたした⁴⁾。このように、道路閉塞リスクを評価するためにも、地域における道路幅員の統計分布は重要な情報である。

腰塚(2002)が指摘するように、どのような距離がどのくらい存在しているかを把握することは、都市の設計や計画の基礎である⁵⁾。道路幅員の統計分布を把握することは、1)交通量に応じた道路網面積の配分、2)前面道路幅員に応じて定まる斜線制限規制のもとで実現する沿道建物の高さや実容積率の分布をそれぞれ把握する際の基礎となる。

道路網は移動のための空間として供されるだけでなく、沿道建物と一体となって街路景観を形成する。Levy(1999)、Harvey *et al*(2016)が指摘するように、道路幅員と沿道建物の高さの関係は、街路景観を形成する上で重要である^{6,7)}。芦原(2001)は、街路景観の評価指標として D/H と W/D を提案し

ている。ただし、 D は道路幅員、 H は沿道建物の高さ、 W は沿道建物の間口を表す。 D/H と W/D はそれぞれ街路景観の圧迫感とリズムを反映する指標である^{8,9)}。このように、街路景観を評価する場合においても、道路幅員 D の統計分布は重要な情報である。

ところが、道路幅員の統計分布を把握する具体的な方法は十分に議論されておらず、理論的にも明らかにされていない。そこで、本稿では、道路幅員の統計分布を理論的に導出することを試みる。以降、横軸を道路幅員とする相対度数分布を「道路幅員の統計分布」として改めて定義する。

数学的には、大小様々な幅をもつ線分が有限平面領域上に分布するとき、線分幅の確率密度関数を定式化する問題に帰着する。腰塚(1986)が指摘するように、道路幅員のような距離分布を解析的に導出する目的は、距離分布とその平均などの特性値の関係を考察することにある¹⁰⁾。後述するように、地域における道路幅員の統計分布を決定する母数として、平均道路幅員だけではなく、最大道路幅員と最小道路幅員も重要である。この知見は、市街地の住環境を総体的に表す指標や住環境整備のための各種事業の採択要件として、従来のように平均道路幅員を用いるだけでは不十分であることを示唆するものである。とくに、最小道路幅員とその構成割合は、地域における災害安全性の評価やその地域間比較を行う際に有効な情報である。

以降、第2節において、既往研究の整理と本稿の位置づけを明確にする。第3節において、様々な幅をもつ線分が有限平面領域上に分布するとき、線分幅の確率密度関数を定式化する問題を考える。第4節において、実市街地を対象に線分幅の確率密度関数を応用し、道路網整備が進んでいない地域において、道路幅員の統計分布を推定できることを示す。第5節において、本稿のまとめと今後の課題を示す。

* 正会員 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 (Department of Urban Engineering, The University of Tokyo)

2. 既往研究の整理と本稿の位置づけ

関連する既往研究として、1)都市空間における道路等の線的施設までの最近隣距離と道路延長密度の関係を理論的に明らかにした研究¹⁾、2)走行時間や走行エネルギーを最小化する道路延長密度を理論的に明らかにした研究²⁾、3)敷地の平均間口と建物棟数密度、道路延長密度、平均道路幅員の関係を理論的に明らかにした研究³⁾がある。

住環境の災害安全性や街路景観の評価指標として、道路幅員の重要性を指摘する既往研究は存在する一方で、道路幅員の統計分布を理論的に把握する方法は明らかにされていない。また、道路幅員の統計分布と平均道路幅員、最大道路幅員、最小道路幅員などの計画論において重要な指標との関係を理論的に明らかにした既往研究も存在しない。道路幅員の統計分布をどの程度の精度で推定できるのかも明らかにされていない。

本稿は、1)線分幅の統計分布を理論的かつ実用性を考慮して導出している点、2)線分幅の統計分布モデルを実市街地における道路幅員の統計分布の推定に応用し、道路幅員の統計分布と平均道路幅員、最大道路幅員、最小道路幅員などの計画論において重要な指標との関係を明らかにしている点、3)道路幅員の統計分布を平均道路幅員、最大道路幅員、最小道路幅員を母数として理論的に定式化している点において、既往研究とは異なる独自性を有する。

3. 線分幅の確率密度関数の定式化

実市街地における道路網をリンク幅のあるグラフ R として扱う。図1のように、隣接交差点間の道路中心線は直線状のリンク e_j として表される。このとき、道路網 R はリンク e_j に対して垂直に幅 $w(e_j)$ をもつ矩形領域 $R(w(e_j))$ の和集合：

$$R = \bigcup_j R(w(e_j)). \quad (1)$$

として表される。隣接交差点間の道路幅員は一定かつ道路幅員階級値 k として与えられる自然数であると仮定しよう：

$$w(e_j) = k, \quad \text{where } k \in K = \{3, 4, \dots, k_{\max}\}. \quad (2)$$

道路網 R を矩形領域の集合として扱う場合、三叉路において、二つの矩形領域 $R(w(e_i))$ と $R(w(e_j))$ の幅及びなす角の大きさ $\theta \in [0, \pi/2]$ に応じて、道路網 R を等積変形する必要がある。図2のように、 $w(e_i) > w(e_j)$ かつ $w(e_i)\sin(\pi/2-\theta) > w(e_j)$ のとき、直角三角形1と直角三角形2の部分でそれぞれ凹凸が生じる。両者の面積は等しいことから、前者を後者の位置へ移動させることにより等積変形は可能である。四叉路においても、二つの三叉路に分解できるため、三叉路の場合と同様に扱うことができる。

いま、リンク e_j の長さを $l(e_j)$ と記すとき、道路幅員階級値が k であるリンクの総延長 A_k は：

$$A_k = \sum_{j \in \{j; w(e_j) = k\}} l(e_j). \quad (3)$$

地域における道路延長を A と記すとき、平均道路幅員 $\bar{w}$ は次式のように定義される：

$$\bar{w} = \sum_{k \in K} k \frac{A_k}{A}, \quad \text{where } \sum_{k \in K} A_k = A. \quad (4)$$

ここで、図3のように、長さ A の線分上において、 $R(w(e_j))$ を $w(e_j)$ の昇順に並び替える操作により、2次元平面において面的な広がりをもつ道路網 R を1次元空間へ帰着させることができる。このとき、 $R(w(e_j))$ を $w(e_j)$ の昇順に並び替えた和集合 R' に着目しよう。1次元空間上において、和集合 R' の任意の位置を x 、位置 x における道路幅員を $w(x)$ と記すとき、 $w(x)$ は x の単調増加かつ非連続関数となる。和集合 R' のうち $x=0$ から $x=\tau$ まで加えた面積（図3における濃灰色の領域の面積）を $S(R'(\tau))$ と記す。以降、 $S(R'(x))$ を「道路面積」と定義する。ただし、 $S(R'(x))$ は、2次元平面上の交差点において、矩形領域が重複する分の面積を含む。このため、和集合 R' の面積 $S(R') > S(R)$ となる。また、 $S(R')$ は次式のように $w(x)$ を用いて記述できる：

$$S(R') = \sum_k k A_k = \int_0^A w(x) dx. \quad (5)$$

さらに、道路面積が $S(R'(x))$ 以下となる確率は：

$$F(x) = \frac{S(R'(x))}{S(R')}. \quad (6)$$

図1：道路網をリンク幅のあるグラフとしてモデル化

図2：三叉路における道路網の等積変形

図3： x - $w(x)$ グラフの概形

以降、本節では、解析的な扱い易さの観点から、**実測値に基づく非連続関数かつ単調増加関数** $w(x)$ の代わりに、**理論モデルとして連続かつ単調増加関数** $u(x)$ を考える：

$$w = u(x). \quad (7)$$

このとき、 x と w は互いに一対一対応の関係にあることから、次式が成立する：

$$\begin{aligned} \Pr\{w \leq t\} &= \Pr\{x \leq \tau\} \\ &= F(\tau) = \frac{S(R'(\tau))}{S(R')} = \frac{1}{S(R')} \int_0^\tau u(x) dx. \end{aligned} \quad (8)$$

つまり、線分幅 w が t 以下となる確率は、地域における道路面積が $S(R'(\tau))$ 以下となる確率と等しい。

ところで、後述する図7と図8のように、道路延長 A と最大道路幅員 $w_{\max}$ は地域によって異なる。このため、(7)式で与えられる w と x の関係式は両者に依存する。両者の違いが $w = u(x)$ の関数形に及ぼす影響を排除するために、 w と x をそれぞれ $w_{\max}$ と A で基準化する。この操作は、図3の x - $w(x)$ グラフから $x/A = z$ と $w/w_{\max} = y$ をそれぞれ横軸と縦軸とする z - $y(z)$ グラフへ変換することを意味する。以降、 z - $y(z)$ グラフを「基準化グラフ」と定義する。次節では、基準化グラフへ変換することにより、地域の違いに関らず、曲線 $y(z)$ は類似するかどうか確認する。

まず、 x を A で割ることによって、 x から z への変数変換を考えよう：

$$z = \frac{x}{A} \in [0,1]. \quad (9)$$

このとき、(8)式の定積分は：

$$\int_0^\tau u(x) dx = \int_0^{z(\tau)} h(z) \cdot A dz. \quad (10)$$

ただし、

$$w = u(x) = u(Az) \equiv h(z). \quad (11)$$

つぎに、(11)式の各辺を $w_{\max}$ で割ることによって、 w から y への変数変換を考えよう：

$$\frac{w}{w_{\max}} = \frac{h(z)}{w_{\max}} \equiv y(z) \in (0,1]. \quad (12)$$

ここで、道路幅員 w の累積分布関数は：

$$G(t) = \Pr\{w \leq t\} = \int_{w_{\min}}^t g(w) dw. \quad (13)$$

ただし、 $g(w)$ は w の確率密度関数である。他方、(8)式、(10)式、(13)式より、道路幅員の累積分布関数は次式のように記述することもできる：

$$G(t) = \frac{A}{S(R')} \int_0^{z(\tau)} h(z) dz = \frac{1}{w_{\max}} \int_0^{z(\tau)} h(z) dz \quad (14)$$

さらに、(14)式の両辺を $w_{\max}$ で割ると、(12)式より、

$$\frac{G(t)}{w_{\max}} = \frac{1}{w_{\max}} \int_0^{z(\tau)} \frac{h(z)}{w_{\max}} dz = \frac{1}{w_{\max}} \int_0^{z(\tau)} y(z) dz \quad (15)$$

(13)式と(15)式より、道路幅員 w の累積分布関数は：

$$G(t) = \int_{w_{\min}}^t g(w) dw = \frac{w_{\max}}{w} \int_0^{z(\tau)} y(z) dz. \quad (16)$$

このように、(8)式の関係を通じて、 w の累積分布関数を x の累積分布関数へ帰着させることができる。(16)式の辺々を t で微分すると、 w の確率密度関数が得られる：

$$g(t) = \frac{w_{\max}}{w} \cdot \frac{d}{dz} \left\{ \int_0^z y(z) dz \right\} \frac{dz}{d\tau} \cdot \frac{d\tau}{dt}. \quad (17)$$

いま、 t と τ はそれぞれ任意の w と x を表すことから、(17)式は次式のように記述される：

$$\begin{aligned} g(w) &= \frac{w_{\max}}{w} \cdot \frac{d}{dz} \left\{ \int_0^z y(z) dz \right\} \frac{dz}{dx} \cdot \frac{dx}{dw} \\ &= \frac{1}{w} h(z) \cdot \frac{1}{A} \cdot \left\{ \frac{du(x)}{dx} \right\}^{-1}. \end{aligned} \quad (18)$$

ここで、(7)式は単調増加関数であることから、 $w = u(x)$ の逆関数は存在する：

$$x = u^{-1}(w). \quad (19)$$

逆関数の導関数は元の関数の導関数の逆数となる：

$$\frac{dx}{dw} = \left\{ \frac{du(x)}{dx} \right\}^{-1} = \left\{ \frac{1}{A} \cdot \frac{dh(z)}{dz} \right\}^{-1}. \quad (20)$$

(18)式と(20)式より、 $g(w)$ は次式のように記述される：

$$g(w) = \frac{1}{w} \cdot y(z) \cdot \left\{ \frac{dy(z)}{dz} \right\}^{-1}. \quad (21)$$

(21)式より、 $y(z)$ の関数形を決定すれば、道路幅員 w の確率密度関数は定まることがわかる。図9と図10のように、実市街地において、 $y(z)$ は非連続関数である一方で、解析的な扱い易さの観点から、 $y(z)$ は**連続関数**として扱う。

ところで、 $g(w)$ を w の陽関数として定式化するためには、 $w/w_{\max} = y(z)$ を z について解く必要がある。(12)式より：

$$\frac{w}{w_{\max}} = y(z) \Leftrightarrow z = y^{-1} \left(\frac{w}{w_{\max}} \right). \quad (22)$$

前述したように、(7)式は x の単調増加関数であることから、(7)式に変数変換を施した $y(z)$ は以下の性質を満たす。

【性質1】 $y(z)$ は**単調増加関数**である：

$$\frac{dy(z)}{dz} > 0. \quad (23)$$

以降、【性質1】に加えて、解析的な扱いやすさと実市街地における z - $y(z)$ グラフとの当てはまりの良さ満ちる関数形のモデルとして、次式で与えられる「指数モデル」を仮定しよう：

$$y(z) = \frac{y_{\min} + e^{\alpha\left(1-\frac{1}{z}\right)}}{y_{\min} + 1} \in (0,1], \quad \alpha > 0. \quad (24)$$

ただし, $w_{\min}/w_{\max}=y_{\min}$, α は $y(z)$ のグラフの形状を特徴づける母数である. $\alpha \geq 2$ のとき, $y(z)$ は凸関数となる.

指数モデルを仮定する理由は, 1)関数形を決定する母数は α のみであり, α の変化と関数形の変化の関係は明瞭であること, 2) (24)式の逆関数 $z=y^{-1}(w/w_{\max})$ の関数形は扱いやすいこと, 3)実市街地における $z-y(z)$ グラフとの当てはまりは良いことの三点である. 以降, これら三点の理由から, 関数形が簡便かつ実用性に優れた指数モデルを仮定する.

図4は, α の値の変化に対する指数モデル $y(z)$ の形状変化を描いたものである. 図4から, α の値が大きいくほど, $y(z)$ のグラフの形状の凸性は強くなることがわかる. 凸性の強さ(弱さ)は, 狭(広)幅員の道路網の多さを反映する. つまり, α の値の変化に着目することで, 道路延長と最大道路幅員が異なる地域における道路網の整備水準の変化を評価することができる. (21)式と(24)式から, 指数モデルの仮定のもとで, $g(w)$ は次式のようになる:

$$g(w) \approx \frac{1}{w} \cdot \frac{\alpha}{\{A - \ln(w - w_{\min})\}^2} \cdot \frac{w}{w - w_{\min}}. \quad (25)$$

$$z \approx \frac{\alpha}{A - \ln(w - w_{\min})}, \quad \text{if } w_{\min} \ll w_{\max}. \quad (26)$$

ただし, $w \in (w_{\min}, w_{\max})$, $A \equiv \ln w_{\max} + \alpha$, $A - \ln(w - w_{\min}) > 0$ である. (25)式から, $g(w)$ は平均道路幅員, 最大道路幅員, 最小道路幅員そして $y(z)$ のグラフの形状を特徴づける係数 α を母数として記述できることがわかる.

図5は, α の値の変化に対する $g(w)$ のグラフの形状変化を描いたものである. 図5から, 1) α の値が小さいほど広幅員道路の構成割合は高くなること, 2) $w \geq 5$ のとき, α の値が2から10へ変化しても, $g(w)$ はほぼ一定であることがわかる.

4. 実市街地における検証

対象地域として, 東京都墨田区の東向島地域と石原地域を選定する⁽¹⁾. 図6は, 東向島地域と石原地域の道路網を描いたものである. μ_R と λ はそれぞれ道路率と道路延長密度を表す. 地域における交差点数が少なく, 平均道路幅員が狭いならば, $\bar{w} \approx \mu_R/\lambda$ の関係が成立し, 10%から15%の精度で平均道路幅員を道路率と道路延長密度から推定できる.

対象地域を選定した理由は, 図6のように, 大小様々な道路幅員で構成されており, 東向島地域のように道路網整備が進んでいない地域と石原地域のように道路網整備が進んでいる地域として対照的な地域だからである. 一見するだけでは道路幅員の統計分布を把握することは難しい.

図7と図8は, 横軸と縦軸をそれぞれ x と $w(x)$ とする $x-w(x)$ グラフを描いたものである. 前節において述べたように, 道路延長 l と最大道路幅員 $w_{\max}$ は地域によって異なる. 両者の違いが $w = u(x)$ の関数形に及ぼす影響を排除するために, w と x をそれぞれ $w_{\max}$ と l で基準化しよう.

図4: α の変化に対する指数モデルの形状変化

図5: α の変化に対する $g(w)$ のグラフの形状変化

図6: 東向島地域(左)と石原地域(右)の道路網

図7: $x-w(x)$ グラフ (東向島地域)

図8: $x-w(x)$ グラフ (石原地域)

図9: $z-y(z)$ グラフ (東向島地域) 基準化グラフ

図10: $z-y(z)$ グラフ (石原地域) 基準化グラフ

図9と図10は、東向島地域と石原地域における $z-y(z)$ グラフを実測値と指数モデルに基づいて描いたものである。指数モデルの母数 α の推定値 $\hat{\alpha}$ は、非線形最小二乗法により数値計算を行って算出したものである。東向島地域と石原地域における $\hat{\alpha}$ の値はそれぞれ4.34と2.80である。このように、実測値から推定される α の値は2よりも大きいため、実市街地における $y(z)$ はほぼ確実に凸関数であることがわかる。

図9と図10から、1)指数モデル $y(z|\hat{\alpha})$ は前述した【性質1】を満たすこと、2)基準化グラフへ変換すると、実測値と指数モデルに基づく $y(z)$ のグラフの形状は両者の地域において類似する傾向にあることがわかる。一方で、対象地域における $\hat{\alpha}$ の値を比較すると、石原地域のほうが東向島地域よりも $\hat{\alpha}$ の値は小さい。つまり、両者の地域における $w_{\max}$ と1の違いを考慮しても、石原地域のほうが相対的に広幅員の道路網で構成されていることがわかる。このように、 $y(z)$ と $g(w)$ のグラフの形状を特徴づける母数 α の値の違いから、道路幅員の構成割合の違いを定量的に評価できる。

図11と図12は、東向島地域と石原地域における道路幅員の相対度数分布と $g(w)$ のグラフをそれぞれ実測値と理論値の統計分布として描いたものである。図11と図12から、1)東向島地域の場合、道路幅員(実測値)の最頻値と第2最頻値はそれぞれ3mと22mであること、2)石原地域の場合、道路幅員(実測値)の最頻値と第2最頻値はそれぞれ6mと11mであることがわかる。また、道路幅員の増加に伴い、東向島地域では、相対度数と $g(w)$ はともに減少傾向にある一方、石原地域では、 $w=6m$ と $w=11m$ において、相対度数と $g(w)$ の乖離は大きいことがわかる。図10のように、 $w=6m$ と $w=11m$ に対応する z の範囲において、指数モデルは単調増加である一方、実測値は一定である。従って、道路幅員の統計分布の実測値と理論値の乖離は、 $y(z)$ の実測値と理論値の乖離に起因するものと考えられる。

道路幅員の統計分布の推定精度を評価するために、カイ二乗適合度検定を行った結果、両者の地域において、有意水準5%の下で、理論値は実測値と適合することがわかった。

図11：道路幅員の相対度数分布（東向島地域）

図12：道路幅員の相対度数分布（石原地域）

その反面、石原地域のように、道路幅員の統計分布の理論値は実測値と十分に適合していない場合もあるため、両者の乖離を改善する必要がある欠点を有する。他方、(24)式の指数モデル $g(w)$ を仮定することにより、1)道路幅員の統計分布の理論モデル $g(w)$ とその母数の関係が明瞭となること、2) $g(w)$ の母数は道路網整備水準の程度観点から意味づけできる利点も有する。とくに、 α は道路幅員の構成割合を反映する指標として意味づけされた。この性質は、道路網整備水準の評価指標として従来から用いられてきた道路率、道路延長密度、平均道路幅員にはない重要な性質である。

都市の計画論の観点から考察しよう。石原地域のように、特定の道路幅員階級値における統計分布の実測値と理論値の乖離は、計画論に基づく街路網整備の成果が反映されたものであると解釈できる。また、東向島地域のように街路網整備が十分に進んでいない地域では、 $g(w)$ を用いて道路幅員の統計分布を簡便に推定できることがわかる。

5. おわりに

本稿では、道路幅員の統計分布を理論的に導出することを試みた。道路幅員の統計分布を線分幅の統計分布モデルとして理論的かつ実用性を考慮して導出した結果、1) $g(w)$ のグラフの形状を特徴づける母数 α の値が小さいほど、広幅員道路の構成割合は高くなること、2)道路幅員 $w \geq 5$ のとき、 α の値を2から10へ変化させても、 $g(w)$ はほぼ一定であることがわかった。

また、線分幅の統計分布モデルを実市街地における道路幅員の統計分布の推定に応用した結果、1)道路幅員の統計分布は平均道路幅員、最大道路幅員、最小道路幅員そして道路幅員の構成割合を反映する指標 α を母数として記述できること、2)街路網整備が十分に進んでいない地域では、道路幅員の統計分布を一定の精度で推定できることがわかった。これらの知見は、地域における災害安全性の評価やその地域間比較を行う際に有効であると考えられる。

今後の課題として、石原地域のように道路網整備が進んでいる地域において、道路幅員の統計分布の実測値と理論値 $g(w)$ の乖離を改善する必要がある。 $g(w)$ の適用範囲を道路網整備が進んでいる地域にも広げるために、 $g(w)$ を理論的により精緻化することを試みたい。

補注

- (1). 道路データとして、道路幅員の分類が詳細である昭文社の「mapple10000 デジタルマップ (shape版)」を使用した。取得年次は2007年、地図情報レベルは10,000である。道路幅員の分類は、3m, 4m, 5m, 6m, 7m, 8m, 9m, 10m, 11m, 13m, 15m, 17m, 19m, 22.5m, 27.5mである。

謝辞

東京大学の浅見泰司教授ならびに匿名の査読者から本稿の改善点をご指摘頂いたことで、本稿の論点をより明確に記述することができました。ここに記し謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) 野澤康(2001),「第11章 住環境整備の諸制度」,浅見泰司編,『住環境 評価方法と理論』,pp.253-255, 東京大学出版会。
- 2) 荒井一弘(2001),「付録 住環境評価指標」,浅見泰司編,『住環境 評価方法と理論』,付録pp.14-28, 東京大学出版会。
- 3) 李明勲・大村謙二郎・石坂公一・糸井川栄一(1997),指定容積率の充足度と基盤状況の関係に関する研究 -1980年代以降の東京都心6区を対象にして-, 1997年度第32回日本都市計画学会学術研究論文集, vol.32, pp.499-504, 日本都市計画学会。
- 4) 都市防災実務ハンドブック編集委員会(2005),「震災に強い都市づくり・地区まちづくりの手引き」,ぎょうせい。
- 5) 腰塚武志(2002),「平面領域における距離分布」,2002年度第37回日本都市計画学会学術研究論文集, vol.37, pp.37-42, 日本都市計画学会。
- 6) Levy, A.(1999), Urban morphology and the problem of the modern urban fabric: some questions for research, *Urban Morphology*, vol.38, no.2, pp.79-85.
- 7) Harvey, C., Aultman-Hall, L., Troy, A. and Hurley, S.(2016), Streetscape skeleton measurement and classification, *Environment and Planning B: Planning and Design*, in press.
- 8) 芦原義信(2001),「街並みの美学」,岩波現代文庫。
- 9) 芦原義信(2001),「続・街並みの美学」,岩波現代文庫。
- 10) 腰塚武志(1986),「都市平面における距離の分布」,谷村秀彦,梶秀樹,池田三郎,腰塚武志著,『都市計画数理』,pp.1-55, 朝倉書店。
- 11) 腰塚武志(1985),都市施設の密度と利用者からの距離との関係について,昭和60年度第20回日本都市計画学会学術研究論文集, vol.20, pp.85-90, 日本都市計画学会。
- 12) 腰塚武志(1994),「走行時間や走行エネルギーを最小にする道路密度」,日本都市計画学会学術研究論文集, vol.29, pp.319-324, 日本都市計画学会。
- 13) 薄井宏行・浅見泰司(2011),建物後退距離と建物および道路密度,都市計画論文集, vol.46, no.3, pp.829-834, 日本都市計画学会。