

ネットワークボロノイクロスK関数法の提案とそのツール開発

佐藤俊明 東京大学空間情報科学研究センター

岡部篤行 東京大学空間情報科学研究センター

Development of a tool for network Voronoi cross K function methods

Toshiaki SATOH (Center for spatial informatin science at the university of Tokyo)

Atsuyuki OKABE (Center for spatial informatin science at the university of Tokyo)

Abstract: The purposes of this paper are: to propose the network Voronoi cross K function (NVCKF) methods which analyze the distribution of points in relations to points, lines and polygons on network Voronoi areas; and to develop a GIS-based tool for performing these methods. First, the paper explains the planar Voronoi cross K function (PVCKF) method which analyzes the points in relations to points on planar Voronoi areas. Second, the paper formulates the point NVCKF method and the line NVCFK method by extending the PVCKF method to a netowrk. Third, the paper implements these computation methods as a GIS-based tool. Last, the paper tests applicability of the proposed methods to actual data analysis using the tool.

1. はじめに

都市空間における様々な地物や現象は相互に影響を受けながら存在もしくは発生している。中でも、駅や主要道路といった長期的に変わらない基盤的な施設（以降、基盤施設と呼ぶ）は、コンビニエンスストアや交通事故などのように短期的に盛衰する施設や現象（以降、非基盤施設と呼ぶ）の分布に強く影響を与える可能性がある。そのため、基盤施設が非基盤施設の分布にどのように影響を及ぼしているかを計量的に調べることは、空間解析においては重要な課題であり、これまでもいくつかの解析手法が開発されてきた。例えば、条件付最近隣法（Okabe and Miki, 1984）やクロス K 関数法（Ripley, 1981）などである。

条件付最近隣法は、基盤施設と非基盤施設の分布関係の平均的な近接傾向を示すもので、大まかな分布関係を把握するには便利な手法である。しかし、基盤施設からどれぐらいの距離にどのような分布傾向があるかを詳細に知ることはできない。このようなことは、最近隣距離法（Clark and Evans, 1954）などでも同様な問題があり、これに対して Ripley (1981) は、この問題点を取り除いた K 関数法を開発した。この K 関数法は、同種類の地物の分布性状を把握するもので、基盤施設に対する非基盤施設の分布性状を把握するには、クロス K 関数法が用いられる。

しかし、このクロス K 関数法も遠方の影響を大きく受ける可能性があることが Okabe ほか(2006)によって指摘されている。地物によっては、最寄りの基盤施設を強く意識して、立地もしくは発生しているものもあると考える。例えば、住宅侵入盗は逃走経路確保の面から主要幹線道路近辺に発生しているといわれており、非基盤施設である住宅侵入盗の犯罪地点は、最寄りの基盤施設である主要幹線道路の影響を強く受けているといえる。

そこで Okabe ほか (2006) は、平面空間上のクロス K 関数法の遠方の影響を取り除くボロノイクロス K 関

数法 (VCKF 法) を提案している。この手法は、平面空間上の基盤施設を母点としたボロノイ図を生成し、その領域内で、直線距離を用いることによる母点と非基盤施設の分布性状を把握するものである。

ところで、都市空間においては、人や物の移動は道路網に規定されている。そのため上記の VCKF 法のように直線距離ではなく、道路に沿った経路距離を用いたほうが、より現実に即した解析が可能となる場合があるであろう。

そこで本論文では、VCKF 法をネットワーク空間へ拡張するネットワーク VCKF 法 (以降、NVCKF 法) の提案とそのツールの開発を行うこととする。

第 2 節で既往の手法である VCKF 法に関して説明し、第 3 節では基盤施設の幾何学的形状の違いによる NVCKF 法を定義する。第 4 節では本論文の手法のプログラムに関する概要を説明し、第 5 節では、本ツールによる解析事例を挙げる。最後に第 6 節としてまとめを述べる。

2. 平面空間上の VCKF 法

平面空間上の VCKF 法は、解析領域内の点密度を ρ (単位: 点数 / 面積), 各母点からの直線距離を r とすると、以下のように定義される。

$$K_{vc}(r) = \frac{\left[\begin{array}{l} \text{基盤施設を生成元としたボロノイ領} \\ \text{域内にあり、同時に基盤施設を中心} \\ \text{に半径内にある非基盤施設の個数} \end{array} \right]}{\rho}$$

また、VCKF 法の期待値 $\bar{K}_{vc}(r)$ は以下の式で与えられる。

$$\bar{K}_{vc}(r) = \left[\begin{array}{l} \text{各母点からの半径 } r \text{ の円とボロノイ} \\ \text{領域で切り取られる面積} \end{array} \right]$$

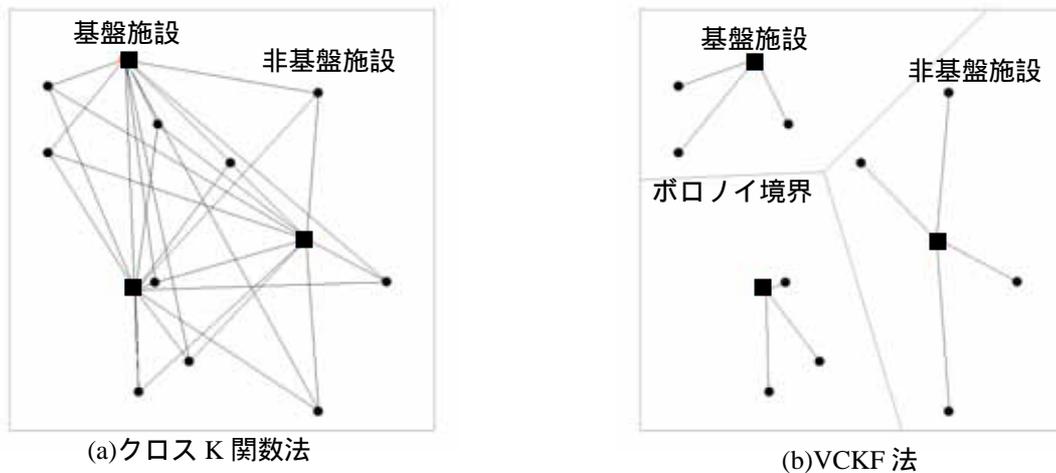


図 1 クロス K 関数法と VCKF 法との違い

クロス K 関数法と VCKF 法との違いは、クロス K 関数法がそれぞれの基盤施設から最近隣の点から最遠方の点まで考慮するのに対して(図 1-(a)), VCKF 法では基盤施設からポロノイ領域内の点だけを対象とすることにある(図 1-(b))。このため VCKF 法の解析結果には遠方の影響が含まれず、最近隣点の遠近を評価するものとなる。なお、クロス K 関数法では非基盤施設を重複してカウントするため、最後に基盤施設の個数で平均を取る必要があるが、VCKF 法ではその必要がない。

3. 生成元の幾何学的形状の違いによる NVCKF 法の定義

本節では、平面空間上の VCKF 法をネットワーク空間上に拡張する。基本的な考え方は、ポロノイ図の代わりにネットワークポロノイ図(以降、NVD)を用いて、そのポロノイ領域内での分布性状を把握するものである。なお NVD は、基盤施設の幾何学的形状により点、線、面の三つに分類される。このうち面 NVD は、線 NVD¹⁾と同様に考えられることから(佐藤・岡部, 2006)、ここでは、点 NVD と線 NVD の場合について定義を行う。

3.1. 点を生成元とする NVCKF 法

点的基盤施設を母点とみなす点 NVCKF 法は、解析領域内の点密度を w (単位: 点数 / 長さ)、各母点からの最短経路距離を d とすると、以下のように定義される。

$$K_{\text{PNVC}}(d) = \frac{\left[\begin{array}{l} \text{点的基盤施設を生成元とした点ネット} \\ \text{ワークポロノイ領域内にあり、同時に} \\ \text{その基盤施設から圏域 } d \text{ 内にある非基} \\ \text{盤施設の個数} \end{array} \right]}{\omega}$$

NVCKF 法の期待値 $\bar{K}_{\text{PNVC}}(d)$ は以下の式で与えられる。

$$\bar{K}_{\text{PNVC}}(d) = \left[\begin{array}{l} \text{各母点からのポロノイ領域内} \\ \text{で、母点から圏域 } d \text{ 内にある} \\ \text{ネットワーク長} \end{array} \right]$$

また、解析対象の総延長が L_T のネットワークに対して、母点からの経路距離 d 内に非基盤施設が多く存在するのか、少なく存在するのかをみる統計的検定には、次に示す経路距離 d における二項分布を用いた二項検定を行えばよい。ここで n は非基盤施設の数を、 k は 1 から n までの整数を示す。

$$P_{\text{PNVC}}(k|d) = {}_n C_k \left(\frac{\bar{K}_{\text{PNVC}}(d)}{L_T} \right)^{n-k} \left(\frac{L_T - \bar{K}_{\text{PNVC}}(d)}{L_T} \right)^k \dots (1)$$

3.2. 線および面を生成元とする NVCKF 法

線的基盤施設を母線とみなす線 NVCKF 法は以下のように定義される。

$$K_{\text{LNVC}}(d) = \frac{\left[\begin{array}{l} \text{線的基盤施設を生成元とした線ネット} \\ \text{ワークポロノイ領域内にあり、同時に} \\ \text{その基盤施設から圏域 } d \text{ 内にある非基} \\ \text{盤施設の個数} \end{array} \right]}{\omega}$$

母線の総延長を $L_{\text{TB}} \neq 0$ とすると NVCKF 法の期待値 $\bar{K}_{\text{LNVC}}(d)$ は以下の式で与えられる。

$$\bar{K}_{\text{LNVC}}(d) = L_{\text{TB}} + \left[\begin{array}{l} \text{母線を除く各母線からのポロノイ} \\ \text{領域内で、母線から圏域 } d \text{ 内にある} \\ \text{ネットワーク長} \end{array} \right]$$

この式が示すとおり、点 NVCKF 法と異なる点は、 $d = 0$ においても期待値が $\bar{K}_{\text{LNVC}}(d) = L_{\text{TB}}$ となり、0 にならない点である。

また、統計的検定は(1)式の $\bar{K}_{\text{PNVC}}(d)$ を $\bar{K}_{\text{LNVC}}(d)$ に代えて用いればよい。

3.3. NVCKF 法のグラフ

NVCKF 法は、クロス K 関数法と同様に、図 2 のような母点(線 NVCKF 法の場合は母線。以下は点 NVCKF 法に関して記述する)からの圏域 d を横軸に、 $K_{\text{PNVC}}(d)$ を縦軸にとり、期待値曲線(図 2 の太線)と棄却域曲線(図 2 の破線)に対して、観測値曲線(図 2 の細線)を比較することにより、基盤施設に対する非基盤施設の分布性状を示すものである。このグラフを用いて、観測値曲線が期待値曲線より高い場合は凝集型を、期待値曲線と同じ場合はランダム型を、期待値曲線より低い場合は均等型(お互いに離れあうような関係)を判断できる。

例えば、図 2 の観測値曲線 A は母点に比較的近い領域では均等型を、母点から遠い領域では凝集型を示す。なお、後述する本ツールでは図 2 にあるような縦方向の点線を表示する。この点線は、ネットワーク総延長に対する一定の割合(図 2 では 10%)のネットワーク長に相当する圏域ごとに区切るものである。これは、期待値曲線はネットワークによって大きく形状が異なり、母点からの圏域内にどれくらいのネットワーク長

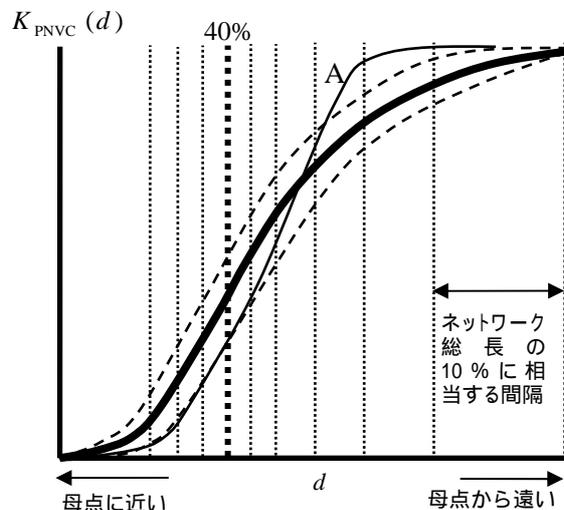


図 2 NVCKF 法のグラフ

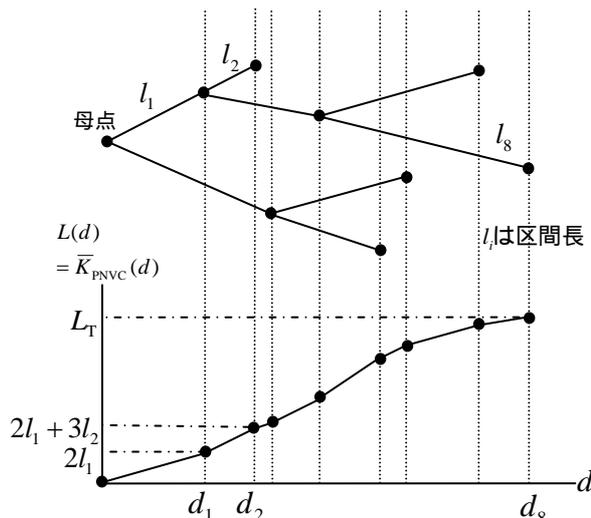
があるかがわかりづらいことから、その目安として表示するものである。例えば、図2の太点線はネットワーク総延長の40%にあたる位置を示し、かなりの範囲で母点に対して有意に均等型を示していることがわかる。

4. ツールの開発

以降、本ツールの点 NVCKF 法に対する処理概要を示す。入力データは、ネットワークデータ、点的基盤施設データ、 n 個の点的非基盤施設データ、棄却域 α およびネットワーク総延長 L_T を等量に分割するための分割数 m である。また出力は点 NVCKF 法のグラフである。

なお、二項検定の計算にはR言語²⁾とR(D)COM³⁾を、ユーザインターフェースにはArcMap Ver.9 を用いて開発した。また、一方通行にも対応している。

- Step1 基盤施設を母点とする NVD を生成する。NVD の生成には最短経路木を求めるダイクストラ法を用いた。その際、リンカー本一本の両端には、生成元からの最短経路距離を格納しておく。なお、一方通行情報がある場合は、これに基づいた NVD を生成する。また同時にネットワークの総延長 L_T を求めておく。
- Step2 図3に示すような圏域 d と圏域内に存在するネットワークの累積長 $L(d)$ 、つまり $\bar{K}_{PNVC}(d)$ の関係を求める。
- Step3 観測点データの位置からネットワーク上の最近隣点を探し、Step1でも求めたその点が存在するリンクの両端点に格納されている基盤施設からの経路距離とリンク長を用いて、最近隣地点における経路距離を求める。次に、この値で昇順にソートすることにより、観測値曲線を求める。
- Step4 L_T を m で除算してネットワーク長の等量間隔を求める。次にこの等量間隔で距離を増分していき、 $\bar{K}_{PNVC}(d)$ の逆関数を用いることによって、そのときの経路距離を求める。



* 図の上部は、ネットワークの最短経路木を示し、下部は、経路距離 d_2 におけるネットワークの累積長を示す。例えば、経路距離 d_2 における累積長は、上部の最短経路木で示される2本の l_1 と3本の l_2 の和である。

図3 経路距離 d 内の総延長の算出

- Step5 R 言語の標準関数である qbinom 関数は、 α 、生起確率 $p(d) = \bar{K}_{PNVC}(d)/L_T$ および n を変数として代入することにより、棄却域に対応する個数を算出できるものである。そこで本ツールでは図 2 で示すような棄却域曲線を得るために、経路距離を細かく増分しながら、その都度、 $p(d)$ をもとめ、 α 、 $p(d)$ および n を qbinom に代入し、 α に対応する個数をもとめる。
- Step6 最後に、Step2、Step3、Step4 および Step5 で求めた値を使って、R 言語による図 2 のようなグラフを作成する。

5. 実データによる解析事例

本節では、点 NVCKF 法と線 NVCKF 法の解析事例をそれぞれ示す。

5.1. 解析用データ

解析に用いるデータは、図 4 に示す京都駅近辺の一方通行を一部に含むネットワークデータである。また、基盤施設としては、交番 (31 地点) (図 4 の 印) と主要道路 (図 4 の太線) を用いる。交番と主要道路は、昭文社の『詳細マップ 1/6,000』を用いて作成した。なお、主要道路は、『詳細マップ 1/6,000』に掲載されている路線名称が載っているものを主要道路と仮定した。また非基盤施設とみなす犯罪地点データとしては、図 5 に示すような車上ねらい (123 地点) (図 5 の 印) とひったくり (146 地点) (図 5 の 印) を用いる。ひったくりは京都府警察のホームページ (<http://www.pref.kyoto.jp/fukei/hanjou/index.html>, 2005 年 12 月現在) から、また車上ねらいは、同じく京都府警察のホームページ (<http://www.pref.kyoto.jp/fukei/hanjou/index.html>, 2006 年 7 月現在) からデータを作成した。

また、ここでは有向 NVD の母点または母線へ向かう方向を「内向き」、母点または母線から外向きに向か



図 4 ネットワークデータと基盤施設

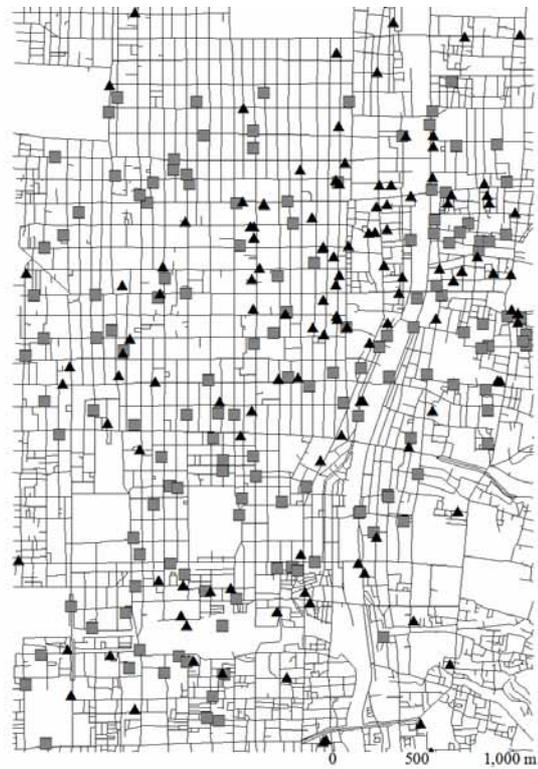


図 5 非基盤施設

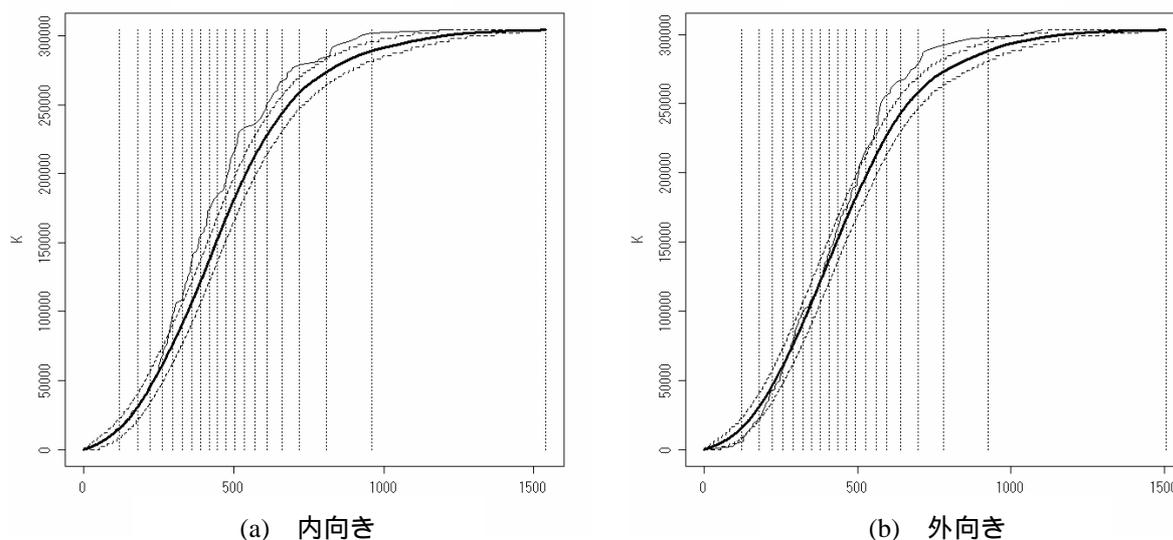


図6 交番に対するひったくりの分布

う方向を「外向き」と呼ぶこととし、一方通行を考慮した解析を行う。

5.2. 点 NCVKF 法を用いた解析事例

平成 17 年警察白書 (2005) では、「空き交番」の問題で、交番への人員増強のほかに、交番配置の見直しを行ったとの報告がある。今後も交番と駐在所の配置見直しは続けるとしているが、こうした計画時には、実際に交番と犯罪の分布関係を明らかにしたうえで行うことは重要なことと考える。そこで、交番を基盤施設とし、車上ねらいとひったくりを非基盤施設として、本論文で提案した手法による解析を行った。なお、棄却域は 10% の両側検定である。またグラフの縦棒の濃い点線は、この点線間の道路長が、総道路長の 5% に相当することを示している。

まず、交番とひったくりの分布関係は、図 6-(a) の内向きの場合、250m (20%) あたりまではランダム型を示し、その後、急激に強い凝集型へ移っていく。図 6-(b) の外向きの場合、200m (15%) までは棄却域曲線の下限と重なるぐらいの強い均等型を示し、それ以上から 400m (50%) ぐらいまでランダム型を、それ以上では凝集型を示す。特に 500m (60%) 以上では棄却域曲線を超えて、強い凝集型を示す。以上のことから、交番に対するひったくりは、一方通行を考慮すると交番から外向きの方向へ、なるべく遠くなるような場所で発生しているといえる。

このことは、警察庁 (2006) (表 5-2) によると、ひったくりは通勤時間帯が多く、そのため交番には立番などを行っている警官がいる可能性も高く (警察庁, 2001)、犯罪者が交番に対してあまりに近すぎる 200m 圏域内では、犯罪場所として選定しないのではないかと推測できる。

5.3. 線 NCVKF 法を用いた解析事例

江口・有馬 (2004) は、福岡市をケーススタディとして、犯罪多発地点の特性を調べ、車上ねらいは主要道路沿いなどで多発していると述べている。しかしこの解析方法は、平面空間におけるカーネル密度法による定性的な判断によるもので、主要道路からどれぐらい離れた場所で事件が発生しているかという詳細な解析は行われていない。また、佐藤・岡部 (2006) は、主要道路とひったくり地点の関係を線ネットワーク最近隣距離法による解析を行い、主要道路に向かう方向に、ひったくりが凝集する傾向があることを調べたが、こ

れに関しても、主要道路からどれくらい離れた場所で事件が発生しているかという詳細な解析は行われていない。

そこで、主要道路に対する車上ねらいとひったくりの分布性状を調べることにする。図 7 は、基盤施設が主要道路で、非基盤施設として車上ねらいとした場合の線 N-CVKF 法の結果を、図 8 は、基盤施設が主要道路で非基盤施設としてひったくりの場合の結果を示す。なお、棄却域は 10% の両側検定である。またグラフの縦棒の濃い点線は、前述と同様であるが、主要道路がネットワーク総延長に対して約 18.5% であるため、図では 20% からの表示となっている。

まず非基盤施設が車上ねらいの場合、内向き（図 7-(a)）に関しては、全体的には凝集型を示す。特に 50 ~ 80m（30 ~ 40%）と 250m 近辺以上で強い凝集型を示すことがわかる。外向き（図 7-(b)）の場合も、全体的に凝集型の傾向を示すが、150m（60%）近辺までは期待値曲線と棄却域曲線のほぼ中央あたりに位置し、それ以上で比較的強い凝集型を示していることがわかる。

以上のように、車上ねらいに関しては、その分布は内向きの場合には全体的に凝集型の傾向を、外向きの場合でも、やや凝集型の傾向を示すことから、江口・有馬（2004）と長澤・細江（1999）による、車上ねらいは主要道路沿いで多く発生し、その理由としては犯行現場への行きやすさと犯行現場からの逃走しやすさの両面から、主要道路近辺で犯行を行うのではないかという結論とほぼ同様な結果を得たといえる。ただし、その傾向は外向きよりも内向きの方が顕著に現れており、今回の事例では、車上ねらいの場合、どちらかというとも逃走しやすさを強く意識しているのではないかと推測できる。

次に、非基盤施設がひったくりの場合では、内向き、外向きの如何にかかわらず 70 ~ 80m（45%）近辺までは期待値曲線より上側にあり、凝集型の傾向を示す。これ以上では、ネットワークの有向・無向によって、分布性状が異なることがわかる。内向き（図 8-(a)）の場合は、全般的に棄却域曲線に近く、強い凝集型を示していることがわかる。外向き（図 8-(b)）の場合は 80m（40%）近辺以上で、均等型を示し、180m（70%）

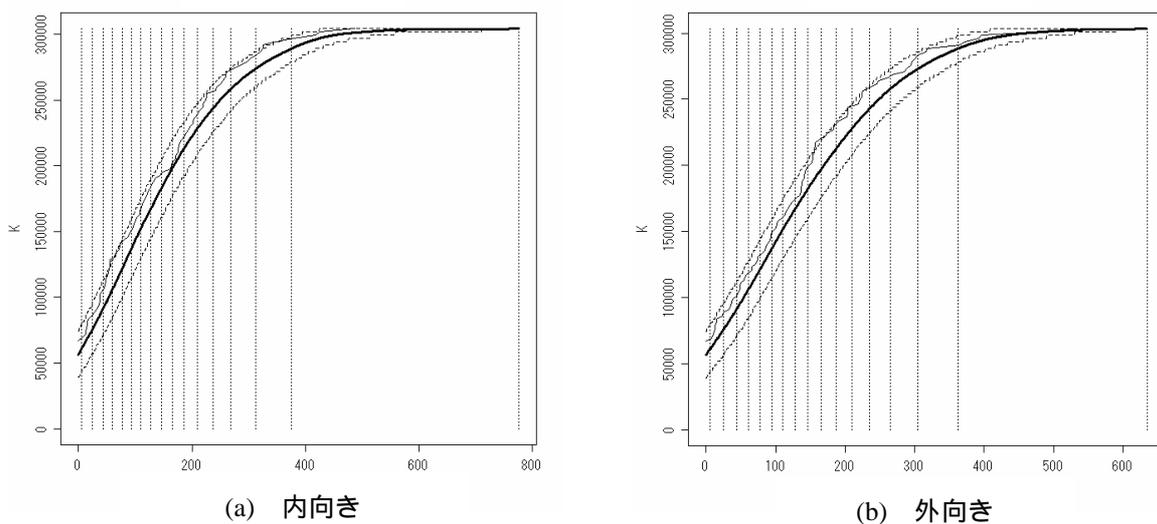


図 7 主要道路に対する車上ねらいの分布

付近で、ランダム型の傾向を示すものの、それ以上では再び均等型の傾向を示すことがわかる。

以上のことから、ひったくりに関しては、一方通行を考慮した場合、主要道路へ向かう側に凝集型の傾向を、逆に外向きの場合には均等型の傾向を示し、犯行にはバイクなどが利用されるため道路交通法に従う必

要があり、逃走経路確保を意識して、犯罪場所の選定を行っているのではないかと推測できる。

以上に示してきた本手法による解析結果は、従来の手法では得ることができない結果で、新たな知見を得る可能性があるという意味において、本手法は有効であるといえる。

6. おわりに

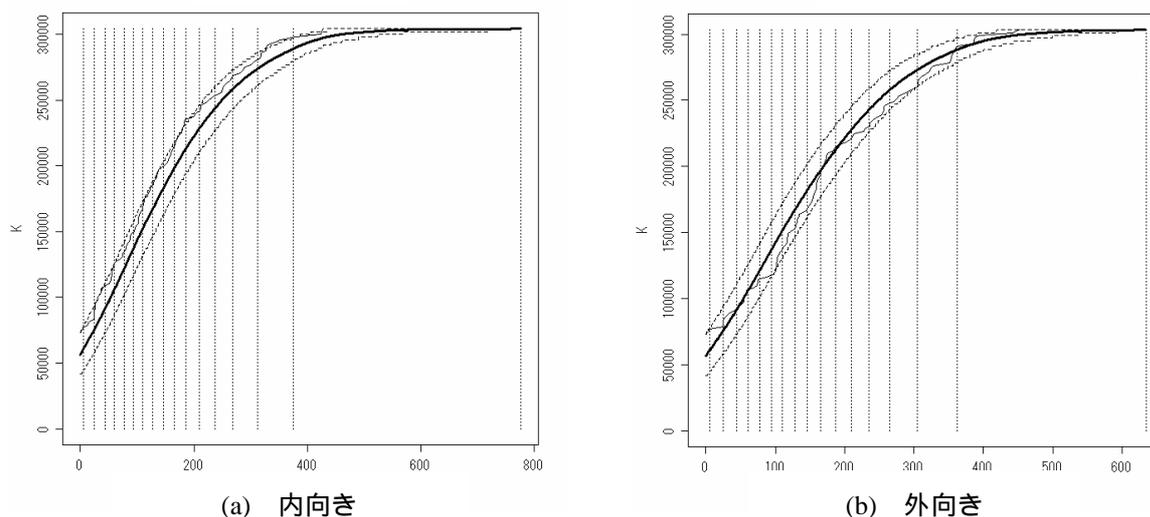


図 8 主要道路に対するひたくりの分布

本論文では、ネットワーク空間上の基盤施設に対する非基盤施設の詳細な分布性状を計量的に示すことが可能な NVCKF 法の提案とそのツールの開発を行った。

また、本ツールを用いて、点 NVCKF 法および線 NVCKF 法の解析事例を示した。点 NVCKF 法では、基盤施設として交番を、非基盤施設としてひたくりを対象とし、線 NVCKF 法の事例では、基盤施設として主要道路を、非基盤施設として車上ねらいとひたくりを対象として解析を行った。これらの解析で得られた結果は、既往の手法では得ることのできなかつたものであり、新たな知見を得る可能性があることから、本手法の有効性が示された。

注

- 1) 線 NVD とは、解析対象領域であるネットワークのサブネットワークを母線とし、その母線とその他のサブネットワークの交差ノードを母点とみなした NVD である。ただし、母線上の経路距離はすべて 0 と仮定する。詳しくは佐藤・岡部(2005)を参照。
- 2) R 言語とは、GNU のもとで開発が進められている統計解析ツールである。
- 3) R(D)COM とは、Microsoft Windows 上の他のプログラミング言語（例えば、VBA など）から R 言語を制御可能とするコンポーネントである。 <http://cran.r-project.org/contrib/extra/dcom/RSrv200.html> を参照。

参考文献

江口聡一郎・有馬隆文 (2004) 空間スケール別に捉えた犯罪多発地区の特性 - 福岡市をケーススタディとして - , 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), 371-372

警察庁 (2006) 平成 17 年警察白書

警察庁 (2001), 国民の身近な不安を解消するためのパトロールの強化等について (通達), http://www.npa.go.jp/seisaku_hyoka/patorol.pdf

佐藤俊明・岡部篤行 (2006) 線及び面を生成元とするネットワークポロノイ図を用いた解析ツールの開発 .
CSIS Discussion paper , 78

長澤秀俊・細江達郎 (1999) 車上ねらいの事例を用いた犯罪発生場所の基礎的研究 , 岩手県立大学社会福祉学部紀要 , 創刊号 , 61-72

Clark, P.J. and Evans, F.C. (1954) Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations.
Ecology, 35, 445-453

Ripley, B. D. (1981) *Spatial Statistics*. New York: Wiley.

Okabe, A., Boots, B. and Satoh, T. (2006) A class of local and global K-functions and cross K-functions, 2006 Annual Meeting, Chicago, Illinois.

Okabe, A.・Miki, F. (1984) A conditional nearest neighbor spatial association measure for the analysis of conditional location interdependence, *Environment and Planning A*, **16**, 163-171