地理情報システムを用いた ウォーカビリティ指数の作成に関するノート

中　谷　友　樹
前　田　一　馬
永　田　彰　平

I. はじめに

健康と近隣環境の関係に着目する視点の１つとして、日常的な身体活動を促す居住地周辺の環境特性をめぐる議論がある[1)]。適度で定期的な身体活動が健康に好ましい影響を及ぼすことはよく知られているが、運動の習慣化を促す上で、自発的な意思決定に頼る限界もあって、歩行など日常的な身体活動を左右する環境の役割が注目されるようになった[2)]。ここでの歩行は、能動的な運動としてのレクリエーション的な歩行に限定せず、買い物や通勤・通学など多様な生活行動に付随するものが含まれる。これら日常的な諸事をこなす目的で実施される歩行を伴った外出行動を円滑になしうる近隣環境の特性は、しばしばウォーカビリティ walkability と呼称される[3)]。ウォーカビリティとは、「歩きやすい」を意味する形容詞 walkable から派生した名詞であり、直接的には「歩きやすさ」を意味する。ただし、近隣環境研究においては「歩いて生活しやすい」特性を包括的に意味して用いられることが多い。

都市の近隣環境に関するウォーカビリティへの注目は、米国における都市計画と公衆衛生学の中間的な領域から生まれた。その背景には、第２次世界大戦後の米国社会でみられた、モータリゼーションの発達に伴う自動車に依存する生活と、それを前提とする郊外スプロール地域の「歩けない」近隣環境での暮らしの拡大が、米国における肥満率の全国的かつ急激な増加をもたらした環境的要因として注目されるようになった経緯がある[4)]。郊外スプロール地域では、自動車での移動を前提とした道路構成から、歩いての移動が不便であることに加え、住宅に限定される画一的な土地利用の広がりの中では、日常的な生活のための諸事を徒歩圏内でこなす機会が得られない。この「歩けない」近隣環境を生み出した、厳格な用途地域制度などの都市計画手法への批判は、ニューアーバニズムあるいはコンパクトシティなどの公共交通機関と歩行を日常生活上の移動手段として重視する都市空間設計の新しい潮流を生み出してきた。日本国内においても、モータリゼーションの発達と中心商業地の衰退などが、とりわけ地方都市を中心に「歩いて生活できない」空間の拡大に寄与していることが指摘されており、その負の側面を解決する地域政策案の１つとして、コンパクトシティへの関心の高まりが認められる[5)]。

健康とウォーカビリティとの関係を実証的に検討するには、日常的な歩行を促す環境特性の度合いを指標化し、これを運動習慣や肥満率のような健康リスクに関する中間的指標、あるいは循環器疾患の死亡率等の健康関連指標と関連づける必要がある。ウォーカビリティ指数（WI: walkability index）は、とくに地理情報システム（GIS）を利用して、土地利用や道路形態等に関する客観的な指

標から、ウォーカブルな環境の程度を得点化する目的で開発された[6]。ただし、ウォーカブルな環境特性の把握には、社会調査によって収集される居住者の主観的な環境評価値や、訓練された観察調査員による通り景観の評価値を利用することも可能である。それらの方法に対し、GIS を利用した指標化は、広範囲にわたって同一の基準による評価指標の作成が可能であり、系統的な地域間比較や俯瞰的な指標分布の把握に有用である。さらに WI あるいはその構成要素得点のような指数値と健康関連指標の関連性が確立された場合、環境の変更によって生じる健康関連指標へのインパクトを予見的に把握できる可能性もある。

ただし、WI のような客観的近隣環境の指標を考える場合、利用可能な地理情報は国・地域によって異なり、単純に欧米で利用されてきた指標を日本で利用できるとは限らない。また、欧米の郊外スプロールを前提にした議論から開発された指標であることから、日本の社会的文脈上、有用な指標であるかは、研究事例の蓄積が必要である。Hanibuchi et al.[7] は、徒歩圏に着目する近隣環境指標群を計算し、愛知県知多半島の高齢者を対象とした歩行量、定期的な運動習慣との関連性を調べている。ただし、歩行量については、歩行の目的を区分できないこともあってか、WI をめぐって提起された土地利用など従来注目されてきた環境特性との強い関連性は確認されず、傾斜等の地形要因との関係がみられた。一方、最近隣の商業集積地や公園等までの距離を含めて定義された客観的環境指標[10] と目的別の歩行量との全国的な関連性は、より明確に確認された[11]。ただし、WI で当初提案された徒歩圏に基づく指標ではないため、研究結果の比較に際しては注意が必要である。

本研究では身体活動との関連性は直接、分析の対象とはしないが、近年、日本でも多様な地理情報が利用可能となった状況をふまえて、日本国内のどの地域であっても構築可能な WI を作成する手順と、その尺度構成上の内部整合性を確認するとともに、留意すべき論点を整理する。以下、II では、WI の本来の定義とその日本版に相当する指標について基礎的な提案を行う。III では、提案した WI の具体的な計算過程と結果を、大規模な疫学調査が実施されている長野県佐久保健所の管轄する圏域を対象に示す。IV では、結果を整理し、その意義と課題を整理する。

II. ウォーカビリティ指数

先の述べたように、米国での郊外スプロールでは、戸建て住宅用地に著しく偏った画一的土地利用が広大に広がり、自動車での移動を前提として、道路の形態や買物場所等の施設へのアクセスが設計されているため、歩行（あるいは自転車）によって日常的に必要な外出行動を遂行するには著しく不便である。そのため過度に自動車に依存し、歩行量が乏しくなり、結果として身体活動量の不足する生活が、郊外スプロール地域で普及し、当該地域の居住者の肥満率を増加せしめたとの仮説が提示された。Frank et al. ほか[12] は、アトランタ都市圏を事例に、人口密度が高く、土地利用の混在している近隣に居住するものほど、自動車依存度は低く（歩行量が多く）、肥満率が低くなる傾向を明らかにしている。さらに、Frank らは、居住地の近隣地区について歩行を促すと想定される環境特性を、GIS（地理情報システム）を利用して客観的に数量化する方法を提案し、その総合的指標をウォーカビリティ指数 Walkability Index（WI）と呼んだ。

Frank らが提案した WI は、居住地から半径 1km を徒歩圏と想定し、それを道路経路での移動距離に従って作成する GIS のネットワークバッファーで操作的に定義する。そして、この徒歩圏域内

について、以下の４つの項目の評価得点に基づいて、その合成指標をWIと定義した。ただし、徒歩圏の範囲に関する閾値は、1km以外にも500m、800m、1.6kmなどが利用される場合もある。

実質的人口密度（NPD: net population density）：住宅用地に限定した区域での居住人口の密度値であり、山林や水域などの非居住区域は人口密度計算の分母である面積から除外される。人口が高密度であるほど、近隣において多様な人との交流機会が生まれ、歩行での外出機会が増えると考えられる。

土地利用の混在度（LUM: landuse mix）：土地利用の構成に関するエントロピー指標によって定義され、この値が高いほど、近隣に多様な土地利用が混在している状況を示す。多様な土地利用の混在は、様々な活動機会が身近に存在し、歩行機会の増加に寄与すると想定されている。

道路の接続性（SC: street connectivity）：徒歩圏内の交差点の密度によって指標化され、この値が高いほど、道路の接続性が高く、歩行による目的地への到達が容易であるため、歩行での外出行動がより促されると考える。

小売床面積比（FAR: retail floor area ratio）：　スーパー等の小売店について敷地面積に対する売場面積の比率で定義される。大規模な駐車場を備えた自動車利用を前提とする店舗では、この比率が小さくなる。逆に、この比率が大きいほど、徒歩での店舗へのアクセスが容易であると考える。

以上のように４つの環境特性の指標は、いずれも値が大きいほど歩行が促されることが含意されており、上記４つの得点を対象地域内でそれぞれZ変換によって標準化（平均0、標準偏差1）した後、次のように合成する形式でWIが定義された[13]。

$$WI_{\mathrm{i}} = ZNPD_i + ZLUM_i + 2\,ZSC_i + ZFAR_i \qquad (1)$$

ここでiは、居住する調査協力者あるいはその住所を識別するインデックスである。また、右辺の各変数記号の先頭にあるZは標準化した得点であることを示す。

概念的には、この指標は米国の郊外スプロールの特徴である、低密度・画一的土地利用・道路の低い接続性・自動車利用を前提とする店舗形態のそれぞれを裏返して指標化したものである。ただし、FAR（小売面積比）は、これを算出できる地理情報を得がたいことや、指標としての有用性も明確でないこともあってか、しばしば省略される[14]。さらに、道路の接続性に他よりも２倍のウェイトを与える根拠も明らかでない。本研究では、日本での徒歩圏に着目するWIを提案した先行研究を参考に[15]、以下の形式をWIの基本形として想定することにした。

$$WI_{\mathrm{i}} = ZNPD_i + ZLUM_i + ZSC_i \qquad (2)$$

ただし、WIを構成する３つの環境指標のそれぞれが、日本での利用可能な地理情報から、容易に得られる訳ではない。とくに詳細な土地利用の地理情報を得ることは難しい。例外的に３大都市圏では、宅地利用動向調査の成果物である10m四方の矩形領域を単位とする細密数値情報と、その後継である「数値地図5000（土地利用）」が利用可能だが、最近のものでは東京都を含まないことや、大都市圏外では利用できない欠点がある。また、ほぼ100m四方の矩形領域を単位とする「土地利用細分メッシュデータ」が全国かつ長期間にわたって利用可能だが、土地利用のカテゴリ項目数が少なく、実質的な居住区域の把握や、都市的生活における多様な活動機会の把握には適していない。

このように詳細な土地利用の地理情報の利用を前提とせずに、日本国内でのWIを作成する必要がある。本研究では、それぞれのWI構成要素については、次のような操作的な定義を行うこととした。

実質的人口密度（NPD）：近隣の実質的な居住人口の密度値として、住所点から徒歩圏1kmの範囲内にある領域ポリゴンと重なる、国勢調査4次メッシュの人口密度を利用した。4次メッシュは、ほぼ500m四方の矩形領域と対応するため、通称500mメッシュとも呼ばれるが、これを50m間隔のラスタデータに変換し、徒歩圏1kmポリゴン領域内に含まれるラスタデータの人口密度平均値をもって、実質的居住人口密度とした。ただし、居住者のいない500mメッシュは非居住区域として、人口密度平均値の計算から除外する。すなわち、徒歩圏ポリゴン領域から、非居住の500mメッシュ領域を取り除き、人口密度を計算した。なお、Hanibuchi et al.[16] は、2万5千分の1地形図の市街地・建物の記号から、50m間隔で居住区域の特定を行い、実質的な居住人口密度の計測を行っている。しかし、この方法は、手作業での判読を伴うため、広域的なデータ処理には向かない。なお、2015年の国勢調査では5次メッシュ（250mメッシュ）および6次メッシュ（125mメッシュ）での集計結果が公開され、より地理的に高い精度での居住区域の判定が可能であり、今後の利用が見込まれる。

施設の利用度（FAC）：土地利用の混在度に代えて、各種の生活関連施設が徒歩圏内にある度合いを指標化した。施設の徒歩利用や運動との関連性は、施設の種類によって異なると考えられるが、その詳細は不明であるため、ここでは国内外の先行研究[17] を参考に、**第1表**に示す21種類の施設中、何種類の施設が徒歩圏内に位置しているかを数え上げた数をもって、当該の指標値とした。徒歩圏内で利用可能性は、居住地から施設までの距離が閾値以内（ここでは暫定的に1km）であれば利用可能とみなす。近隣の生活関連施設の多さは、近隣の土地利用の混在度の高さを反映するばかりでなく、徒歩での外出機会を把握するより具体的な指標と考えられ、この値が高いほど徒歩での外出行動が増加すると想定される。

道路の接続性（SC）：この構成要素のみ、基本的な修正を要さない。交差点を道路ネットワークのデータから生成し、3つ以上の道路セグメントと結びついたネットワーク上のノードを交差点とみなして、徒歩圏領域内の交差点密度を計算する。

以上の修正の結果として、欧米で利用されてきたWIに相当する徒歩圏領域に着目する日本版WIを、次のような合成得点として定義する。

$$WI_i = (ZNPD_i + ZFAC_i + ZSC_i)/3 \qquad (3)$$

なお、WIが標準化された得点と同様に解釈できるよう、右辺を3で除している。

III. 佐久保健所管轄圏でのウォーカビリティ指数

前章で定義した日本版WIについて、具体的な計算の過程と結果を、長野県佐久地域（保健所管轄圏）を事例に示す。GISに関するデータ処理は、ArcGIS Desktop 10.5（ESRI Inc.）およびそのエクステンションであるNetwork AnalystおよびSpatial Analystを利用した。

第１表　施設の利用度の計測に利用した施設一覧

	施設	領域分類	佐久地域内件数（10km圏全件数）	10km バッファの考慮	データ年度	出典	備考
1	コンビニ	小売（総合）	65　(156)	有	2015 年 10 月	電話帳	業種分類「K401（コンビニ）」
2	スーパーマーケット		31　(76)	有	2015 年 10 月	電話帳	業種分類「K402（スーパー・デパート）」
3	食品小売店	その他小売	317　(772)	有	2015 年 10 月	電話帳	業種分類「J370 ～ J381」（注 3）
4	書店		17　(35)	有	2015 年 10 月	電話帳	業種分類「K412・K414（書籍・書籍販売）」
5	薬局・薬店		92　(193)	有	2015 年 10 月	電話帳	業種分類「A112（薬局・薬店）」
6	小学校	教育機関	28　(NA)	無	2013 年	国土数値情報「学校データ」	
7	中学校		14　(NA)	無	2013 年	国土数値情報「学校データ」	
8	役場・出張所	行政サービス	17　(NA)	無	2008 年　4 月	国土数値情報「市町村役場等及び公的集会施設データ」	分類コード「1・2・3（本庁・支所・その他行政サービス施設）」
9	公民館等		80　(NA)	無	2008 年　4 月	国土数値情報「市町村役場等及び公的集会施設データ」	分類コード「4・5（公立公民館・公的集会施設）」
10	公的図書館		9　(NA)	無	2013 年	国土数値情報「文化施設」データ	分類コード「03003（図書館）」
11	カフェ・喫茶・ファストフード	飲食	86　(269)	有	2015 年 10 月	電話帳	業種分類「B134･B142（カフェ・喫茶店・ファーストフード）」
12	その他飲食店		728（1791）	有	2015 年 10 月	電話帳	業種分類「B」（注 4）
13	フィットネスクラブ・ジム	運動施設	45　(109)	有	2015 年 10 月 2013 年	電話帳・国土数値情報「文化施設」データ	業種分類「S648・S642（フィットネスクラブ・ジム）」 分類コード「03109（体育館）」
14	公園		35　(81)	有	2015 年 10 月	国土数値情報「都市公園」	
15	郵便局	金融サービス	52　(124)	有	2013 年 11 月	国土数値情報「郵便局」	
16	銀行		11　(29)	有	2015 年 10 月	電話帳	業種分類「X794（銀行）」
17	バス停	公共交通機関	462（1493）	有	2010 年　7 月	国土数値情報「バス停留所」	
18	鉄道駅		23　(41)	有	2016 年 12 月	国土数値情報「鉄道」	
19	医療施設　内科系	医療	66　(148)	有	2010 年	PAREA Medical 病院・診療所	内科、循環器科、呼吸器科、消化器科、胃腸科、肝臓科、神経内科、腎臓内科、心療内科、血液内科、小児科、精神科、神経科、アレルギー科、リウマチ科、内分泌科、人工透析科
20	医療施設　外科系		30　(63)	有	2010 年	PAREA Medical 病院・診療所	外科、整形外科、脳神経外科、心臓血管外科、胸部外科、腹部外科、呼吸器外科、消化器外科、形成外科
21	医療施設　婦人科系		7　(17)	有	2010 年	PAREA Medical 病院・診療所	産婦人科、産科、婦人科

注１：「電話帳」とは、NTT 電話帳「ハローページ」を指し、法人を抽出した「ハローページデータ（法人）全国版（業種付）」（株式会アインツ）を使用した（http://teldata-business.jp/）。ただし、業種分類の定義は株式会社アインツによる。

注２：「国土数値情報」とは、国土交通省国土政策局「国土数値情報ダウンロードサービス」を指す（http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html）。

注３：「3 食品小売店」に分類されるものは以下の通り。酒販売、その他食品・食材、魚・海産物・海産加工物、豆・米・穀類、野菜・果物、茶・珈琲・清涼飲料水、肉類、豆類穀類の加工品・乳製品、パン、調味料、牛乳、お菓子・スイーツ

注４：「12 その他飲食店」に分類されるものは以下の通り。飲み屋・居酒屋、一般レストラン、和食・郷土料理、肉調理店（焼肉・焼鳥・ステーキ等）、菓子・洋菓子、お菓子・スイーツ、専門店・各国料理、寿司店、中華料理ラーメン、弁当・宅配、お好み焼き・たこ焼き等、麺類（うどん）、麺類（そば）、麺類（その他）、カレー店。

注５：「10km バッファの考慮」：佐久保健所管轄区域（佐久市、佐久穂町、小海町、川上村、南牧村、南相木村、北相木村）に隣接地区として周囲 10km の範囲の施設の利用を考慮したか否かを示す。

注６：PAREA-Medical は、国際航業株式会社の販売する GIS データ製品である。

対象地域（**第１図**）は、長野県東部に位置し、佐久市、南牧村、佐久穂町、小海町、川上村、南相木村、北相木村の７市町村から構成される。2010 年国勢調査の結果によれば、人口総数は約 12.8 万人、総世帯数は約 4.6 万人である。対象地域の最北部に位置する佐久市は、盆地地形の内部に比較的広域な平地部を有し、人口の大半が集中する。町村部は、中心を北へ流れる千曲川沿い以外は、大半は山地である。**第２図**には、500m メッシュに基づく 2010 年時点での人口分布を示してある。

この地域は、国立がん研究センターが各機関と連携して推進している次世代多目的コホート研究（JPHC NEXT）[18] の対象地域の１つであり、40 - 74 歳の居住者を対象に、2011 年よりベースライン調査が開始されている。生活習慣などに関するアンケート調査がおよそ 3.1 万人の規模で実施されており、今後も継続的な調査が計画されている。

（1）ウォーカビリティ指数の評価地点

本研究では、ウォーカビリティの観点から、対象地域の地域特性を評価するために、2010 年国勢調査による基本単位区を住所起点として、各起点を中心とする徒歩圏を対象とした WI の計測を行う。基本単位区とは、1990 年以降、国勢調査において利用されている最小の地域単位であり、市街地では街区（住所の番地）に相当する微細な地理的統計単位である。国勢調査の時期によって標章される項目は異なるが、2010 年の国勢調査では、人口、世帯数の情報が得られる。対象地域では、2010 年において 1,560 個の基本単位区がある（**第３図**）。居住者のいない基本単位区も一部に含まれるが、WI の地理的分布を把握するために、全基本単位区を対象に指標の作成を実施した。基本単位区についての統計は、政府統計のポータルサイトである e-Stat で得られるものの、図形代表点の地理座標については、ESRI ジャパン株式会社の GIS データ製品である「ArcGIS Stat Suite 平成 22 年国勢調査 基本単位区」を利用した。なお、ArcGIS Stat Suite は、購入時には ArcGIS Data Collection

第１図　研究対象地域

第２図　対象地域の人口分布
2010 年国勢調査 500m メッシュによる

第３図　対象地域の基本単位区の分布

の製品名で販売されていた。以下、同様な利用データ名の記載にあたっては、現在流通している製品名で示してある。

(2) 近隣領域の特定

道路を利用した歩行圏は、起点となる地点（本研究では基本単位区）から歩行での移動が可能な道路ネットワーク上での距離が、一定の閾値以下（本研究では 1km 以下）の範囲であるネットワークバッファー領域として操作的に定義される。厳密には、ネットワークバッファー領域は道路ネットワーク上でのみ定義されるが、GIS 環境では、道路ネットワーク周辺の領域を含むポリゴン領域として生成される。ArcGIS Network Analyst では、「単純化」と「詳細」の２つのポリゴン領域生成モードが含まれる。道路が密に走る領域では両者の違いは少ないが、**第４図**に示すように、道路網が疎な領域では、「単純化」ネットワークバッファーは、明らかに不自然な広がりを示し、道路の接続性も適切に反映されない。そのため、本研究では、高速道路・有料道路を除く道路に基づいた道路ネットワークを利用し、基本単位区を起点とした「詳細」1km ネットワークバッファー領域を、徒歩圏の近似的な領域とした。道路データは、ESRI ジャパン株式会社の GIS データ製品である「ArcGIS Geo Suite 道路網」(2012 年版）を利用した。本研究では、実質的人口密度および道路の接続性（交差点密度）は、このネットワークバッファーによる徒歩圏の範囲を利用して計算している。

第４図　２種類のネットワークバッファーの比較

ところで、住所起点（基本単位区）と施設は必ずしも、道路ネットワーク上に存在しない。ArcGIS の環

境では、住所起点からみて最近隣の道路ネットワーク上の位置からネットワーク距離を計算し、ネットワークバッファー領域を生成する。しかし、住所起点から最近隣の道路までの距離および、同様に施設から最近隣の道路までの距離は、ネットワークバッファー領域の生成にあたって考慮されない。また、「詳細」モードのネットワークバッファー領域では、道路に近接する領域のみがこれに含まれるため、施設の代表点が道路から一定以上離れていると、ネットワークバッファー領域に含まれず、この施設はいずれの住所からも利用できない判定になる。そのため、「詳細」モードのネットワークバッファー領域では、施設への近接性を適切に評価できない可能性が生じる。

そこで施設アクセスの評価では、以下のように、住所起点 i と施設 j までの距離をより厳密に測定した（**第 5 図**）。

第 5 図　居住地と施設間の距離計算

$$D_{ij} = s_i + d_{ij} + s_j \qquad (4)$$

ここで、s_i と s_j は、住所起点 i および施設 j のそれぞれから道路ネットワークまでの距離、dij は、i および j のそれぞれからみて最近隣となる道路上の点間の道路経路距離である。具体的な距離計測について、s_i および s_j は ArcGIS の Near ツールを利用し、d_{ij} は、ArcGIS Network Analyst のコストマトリックス解析の機能を利用した。この場合、$D_{ij} \leqq$ 1km であれば施設 j は住所 i の徒歩圏にあるとみなすことになる。

(3) ウォーカビリティを構成する環境指標の計測

実質的人口密度（NPD）：住所起点（基本単位区）の 1km ネットワークバッファー領域内に含まれる居住区域内での人口密度として計算した。前章で説明したように、本研究では 500m メッシュで総人口が 1 以上の領域を居住区域とみなしている。ただし、500m メッシュ・ポリゴンと 1km ネットワークバッファー・ポリゴンとのポリゴン対ポリゴン・オーバーレイ処理は、計算負荷が大きすぎるため、500m メッシュの人口密度データ（2010 年国勢調査による）を 50m 間隔のポイントデータに変換した後、ネットワークバッファー領域内に含まれる当該ポイントデータを集計（ArcGIS の Spatial Join によって集計した人口密度の平均値）して、実質的人口密度とした。ここで、人口密度に関する 500m メッシュから 50m 間隔のポイントデータへの変換は、500m メッシュを 50m 間隔のラスタデータに変換した後、ラスタ･ベクタ変換を施すことで達成している。なお、ArcGIS の機能的限界として、重複領域のあるネットワークバッファー・ポリゴンが複数ある場合、それぞれの範囲のラスタデータを一度に集計できない。そのため、ラスタ・ベクタ変換を施してからポイント－ポリゴン（Spatial Join の一形態）の集計作業を行う必要がある。

施設の利用度（FAC）：前節に示したように、住所起点から施設までの精密な距離計測に基づいて、各施設が徒歩圏内にあるかどうかを判定した。この徒歩圏内で利用可能な施設の種数は、以下のよ

うに定義できる。

$$F_i = \Sigma_k I(min_{j \in S_k} D_{ij} \leq D_{max}) \qquad (5)$$

ここで、k は施設の種類を示すインデックスである。施設の種類 k に属す施設の集合 S_k の要素である施設 j の中で、住所起点 i からの距離が最小となる施設について、D_{ij} が徒歩可能な距離限界 D_{max}（本研究では 1km）以下であれば、指標関数 I は 1 を、そうでなければ 0 をとる。

$$I(min_{j \in S_k} D_{ij} \leq D_{max}) = \begin{cases} 1 & if\ min_{j \in S_k} D_{ij} \leq D_{max} \\ 0 & otherwise \end{cases} \qquad (6)$$

施設の代表点地理座標については、第 1 表に示すように一部は電話帳（NTT ハローページ）に掲載されている住所文字情報をジオコーディングして得ている。ジオコーディングには、ESRI ジャパン株式会社の GIS データ製品である「ArcGIS Geo Suite 住居レベル住所」（2016 年版）と ArcGIS のジオコーディング機能を利用し、街区（番地）以上の位置精度で、施設の立地点を特定した。また、第 1 図に示すように、一部の公的な施設を除き、対象地域周辺のバッファー領域内の施設へのアクセスも、指標の計算にあたっては考慮できるようにしている。なお、1km の徒歩圏であればこの利用する施設として対象地域周辺の 1km バッファー領域を考えれば十分だが、本研究では別途自動車利用等のアクセスの計測に指標を発展させることも想定して、10km のバッファー領域を設定した施設データを準備した。

SC 道路の接続性（street connectivity）：　接続する道路セグメント数が記録されている道路交差点の情報が利用可能でない場合、道路ネットワークデータから当該のデータを生成する必要がある。幾つかの方法が考えられるが、経験的に最も効率的な方法として、以下の手順を採用した。

Step 1. 高速道路など事前に不要な部分を削除した道路データを用意する。

Step 2. ArcGIS の Feature to Line ツールを利用して、ラインをセグメント単位に分割する。

Step 3. ArcGIS の Feature Vertices to Points ツールを適用し、セグメント端点を得る。

Step 4. ArcGIS の Collect Events ツールで、重複する端点の数を属性（ICOUNT）にもったポイントデータを生成し、ICOUNT >=3 を満たすポイントを交差点とみなし保存する。なお、ICOUNT=1 は行き止まりとして、別途指標化することもできる。

Step 5. 住所起点からのネットワークバッファー領域内に含まれる交差点ポイント数を Spatial Join を利用して集計して、SC 得点とする。

（4）ウォーカビリティ指数の合成結果

基本単位区を利用した 3 つの WI 構成要素である環境指標得点 NPD, FAC, SC それぞれの分布と互いの相関関係を**第 6 図**に示した。各要素得点間は高い正の相関関係が認められるが、第 6 図の対角要素に示すヒストグラムから明らかなように、得点分布は右に裾が長い歪んだ分布であることが確認され、一部で極端に高い値を示す地区がみられる。こうした外れ値的な高い値の影響を緩和するために、平方根変換によって分布の歪みを補正した後、基本単位区の総人口で重み付けした平均と（不偏）標準偏差を利用した Z 変換を利用して、WI を合成した。例えば、実質的人口密度の成分については、以下のように平方根変換した標準化得点 $ZsqNPD_i$ を求める。

第６図　ウォーカビリティ指数を構成する３環境指標間の相関

対角の矩形領域はそれぞれの指標のヒストグラムを示す。対角より左下側の矩形領域は、指標間の標準的散布図である。対角より右上側の矩形領域は、指標間の散布図をカーネル密度変換したものであり、色が濃い箇所は点（基本単位区）の密度が高いことを意味する。図中の r は無変換の、$r.sq$ は平方根変換した指標間での積率相関係数である。

$$ZsqNPD_i = \left(\sqrt{NPD}_i - mean\left(\sqrt{NPD}\right)\right) / sd\left(\sqrt{NPD}\right) \qquad (7)$$

ここで、$mean$（V）と sd（V）は変数 V に関する対象地域全体での（人口で重み付けした）平均、不偏標準偏差をそれぞれ意味する。他の２つの構成要素得点についても同様に変換した得点を利用して、最終的な WI を以下のように算出した。

$$WI_i = \left(ZsqNPD_i + ZsqFAC_i + ZsqSC_i\right) / 3 \qquad (8)$$

こうした合成変数の内的な整合性から信頼性を評価する指標として、クロンバッハの α 係数が知られる[19]。この値がおおよそ 0.7 ないし 0.8 以上であれば、合成に利用した変数間で一貫した評価がなされていると判断される。評価する平方根変換し標準化した３つの指標についてクロンバッハの α を求めると 0.88 であり、内的整合性のある合成指標となっていることが分かる。

WI と各構成要素である３つの環境指標得点（変換前）について、その地理的分布を、**第７図**に示

(a)　実質的人口密度

(b)　施設の利用度

(c)　道路の接続性

(d)　ウォーカビリティ指数

第７図　ウォーカビリティ指数および構成環境指標の地理的分布

した。ここでは、地理的分布の傾向をわかりやすく示すために、基本単位区別に得られた得点を、クリギング法による空間補間により、人口が 0 でない 500m メッシュの領域を対象とする 10m 間隔のラスタデータに変換して示してある。全体として、佐久市の盆地内の市街地を中心に WI の得点が高く、とくに、対象地域の中心を南北に走っている JR 小海線の鉄道駅周辺を中心に WI の得点が高い地区が連続している。それに対して、町村部では居住地の分布が限定的であるとともに WI の得点も全体的に低い傾向であることが分かる。

IV. 結語

本研究では、自動車に依存しない「歩いて生活できる」近隣環境特性を客観的に指標化するウォーカビリティ指数 WI（walkability index）について解説し、その日本版に相当する指数値の定義と、GIS 環境を利用した演算過程を整理した。ここでは、基本単位区を住所起点として近隣の範囲を特定し WI の値を得たが、疫学研究では調査協力者の住所をジオコーディングし、改めて WI を計算することが多い。ただし、正確な住所が得られても、街区方式の住所表記がなされていない地域では、ジオコーディングしても基本単位区以上の精度で位置を特定することは難しいことも多い。そのため、基本単位区は、疫学的な分析が実際になされる位置精度に相当するとおおよそ見なしうる。また本研究では、基本単位区別に得られた指標の統計的な分布や地理的な分布を示したが、基本単位区を利用した指標値は、保健所管轄区や市区町村、学校区などの保健活動のための地域単位にあわせて集計し、各地域の特性の把握や地域間比較に供することも容易である。

本研究の１つの成果として、日本国内においても、一貫性のある合成指標として WI を得られることを示したことがあげられる。3 つの WI の構成要素の中で、施設の利用度指数は、歩行による外出機会を直接的に把握できる抽象度の低い指標だが、多くの施設情報を準備し、距離計算を繰り返す必要があるため、最も作成にコストを要する。しかし、より作成の手間が少ない実質的人口密度や道路形態の指数である交差点密度と、施設の利用度とは高い正の相関関係が認められる。他の地域でもこれが同様であるならば、道路形態に着目した簡易な指標によっても、ウォーカビリティを評価できることになる。実際に、道路形態に着目した指標のみと歩行量との関係が確認されている[20]。

ただし、道路形態を利用したウォーカビリティ指数と歩行量などの身体活動量との相関関係が認められた場合でも、道路形態が施設の利用度（多様な施設へのアクセス）を反映した指標である点に注意が必要である。例えば、介入にあたって単純に道路形態を変更しても、身体活動への影響は乏しいかもしれない。また、施設への利用度においても、本研究では得点を算出する上で、施設の種類による重み付けは施していないが、公園、公共交通機関、運動施設等の施設の機能的な違いによって、利用の頻度や限界距離、身体活動との関連性は異なると考えられる。日本でその詳細を把握する研究デザインは今後の課題として残されている。また、どのような近隣環境特性の変更が、歩行などの日常的な身体活動に影響するのかを把握できる因果関係の分析は、クロスセクショナルな分析デザインでは難しく、近隣環境の変化と関連づけたパネルデータの分析などが必要である。

なお、ウォーカビリティとして呼称される地域特性の指標は、歩行に限らず運動習慣や BMI、肥満率などと関連づけられる場合があり、その結果は、運動習慣の中で歩行のみに限定して理解する必要はない。さらに、ウォーカビリティを身体活動の規定因と考えるか、都市計画上の成果や目標と考えるかといった概念上の混乱もあり、疫学的には身体活動と関連する近隣環境の特性として、紛らわしい用語の使用を避けるべきとの意見もある[21]。

その一方で、ウォーカビリティとその指数化の研究は、疫学研究の文脈を離れても、具体的な生活行動と関連づけて地域特性を把握する地理情報処理の有用性を示した点で意義深い。日本の地理的、歴史的な背景と社会的課題の中で、生活行動との関連性が明確で、十分に精度を持つ地理的指標の充実と体系化は、地域政策的にも地理学的にも価値ある研究課題と考えられる。

付記

本研究を進めるにあたって基盤研究（A）26253043 および（B）15H02964 の助成を利用した。

注

1）① Sallis, J.F., Floyd, M.F., Rodriguez, D.A., and Saelens, B.E.: Role of built environments in physical activity, obesity, and cardiovascular disease. *Circulation* 125, 2012, pp. 729-37. ②埴淵知哉･中谷友樹「地域のウォーカビリティとソーシャル・キャピタル」体育の科学 66, 2016, 805-10 頁. ③ 難波考太・室町泰徳「都市環境が徒歩行動と健康に与える影響の研究」都市計画論文集 42, 2007, 925-30 頁.

2）①井上茂・下光輝一「生活習慣病と環境要因－身体活動に影響する環境要因とその整備－」医学のあゆみ 236, 2011, 75-80 頁.　②井上茂「身体活動と環境」日本公衆衛生雑誌 55, 2008, 403-6 頁.

3）Forsyth, A.: What is a walkable place? The walkability debate in urban design. *Urban Design International* 20, 2015, pp. 274-92.

4）中谷友樹「健康と場所―近隣環境と健康格差研究―」人文地理 63, 2011, 58-75 頁.

5）戸所隆編著『歩いて暮らせるコンパクトなまちづくり（地域づくり叢書 4)』古今書院, 2016.

6）Frank, L.D., Sallis, J.F., Conway, T.L., Chapman, J.E., Saelens, B.E. and Bachman, W.: Many Pathways from Land Use to Health: Associations between Neighborhood Walkability and Active Transportation, Body Mass Index, and Air Quality. *Journal of the American Planning Association* 72, 2006, pp. 75-87.

7）Hanibuchi, T., Kawachi, I., Nakaya, T., Hirai, H. and Kondo, K: Neighborhood built environment and physical activity of Japanese older adults: results from the Aichi Gerontological Evaluation Study（AGES）. *BMC Public Health* 11, 2011, 657.

8）Hanibuchi, T., Nakaya, T., Yonejima, M., Honjo, K.: Perceived and Objective Measures of Neighborhood Walkability and Physical Activity among Adults in Japan: A Multilevel Analysis of a Nationally Representative Sample. *Int J Environ Res Public Health* 12, 2015, pp.13350-64.

11）Koohsari, M.J., Hanibuchi, T., Nakaya, T., Shibata, A., Ishii, K., Liao, Y. Oka, K. and Sugiyama, T.: Associations of Neighborhood Environmental Attributes with Walking in Japan: Moderating Effects of Area-Level Socioeconomic Status. *J Urban Health* 94, 2017, pp. 847-54.

12）①前掲 6)、② Frank, L.D., Andresen, M.A. and Schmid, T.L. Obesity relationships with community design, physical activity, and time spent in cars. *Am J Prev Med*. 27, 2004, pp. 87-96. ③ Frank, L.D., Schmid, T.L., Sallis, J.F., Chapman, J. and Saelens, B.E.: Linking objectively measured physical activity with objectively measured urban form: findings from SMARTRAQ. Am J Prev Med. 28, 2005, pp. 117-25.

13）前掲 6)。

14）前掲 12）②, ③など。

15）① Hanibuchi, T., Kondo, K., Nakaya, T., Shirai, K., Hirai, H. and Kawachi, I.: Does walkable mean sociable? Neighborhood determinants of social capital among older adults in Japan. *Health and Place* 18, 2012, pp. 229-39. ② Leslie, E., Coffee, N., Frank, L., Owen, N., Bauman, A. and Hugo, G.: Walkability of local communities: using geographic information systems to objectively assess relevant environmental attributes. *Health and Place* 13, 2007, pp. 111-22.

16）前掲 7)。

17）① 前掲 7), 15), ② Witten, K., Pearce, J. and Day, P.: Neighbourhood Destination Accessibility Index: A GIS Tool for Measuring Infrastructure Support for Neighbourhood Physical Activity. *Environment and Planning A*. 43, 2011, pp. 205-23.

18）国立がん研究センター:JPHC-NEXT 次世代多目的コホート研究 http://epi.ncc.go.jp/jphcnext/（最終閲覧日 2018 年 1 月 10 日）

19）Cronbach, L.: Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika* 16, 1951, pp. 297-333.

20）Koohsari, M.J., Sugiyama, T., Shibata, A., Ishii, K., Liao, Y., Hanibuchi, T., Owen, N. and Oka, K.: Associations of street layout with walking and sedentary behaviors in an urban and a rural area of Japan. *Health and Place* 45, 2017, pp. 64-9.

21）①前掲3)，②Hajna, S., Ross, N.A., Griffin, S.J. and Dasgupta, K.: Lexical neutrality in environmental health research: Reflections on the term walkability. *BMC Public Health* 17, 2017, 940.

中谷　友樹（本学文学部教授）
前田　一馬（本学大学院博士後期課程）
永田　彰平（ESRI ジャパン株式会社）

A Note on Building GIS-Based Walkability Index of Japan

by
Tomoki Nakaya, Kazuma Maeda and Shohei Nagata

It is well-known that regular physical activity has various positive effects on health. Residential environmental factors that affect regular physical activity such as walking have become a research focus bridging spatial and health sciences. As a key concept, characteristics of the neighborhood environment around residential places promoting daily walking are often referred to as 'walkability.' It originally appeared in the intermediate area of urban planning and public health in the US. After WW II, large developments of suburbs, the so-called suburban sprawl, created unwalkable living places adapted to the lifestyle in the age of motorization. Such expansion of unwalkable living space was considered as an influential environmental factor that caused a sharp increase in the obesity rate in the US. Even in Japan, it has been argued that the development of motorization and the decline of the traditional central commercial area have contributed to the expansion of unwalkable space, especially in cities outside metropolitan regions.

The walkability index（WI）was proposed with the aim of scoring the degree of walkable environment from objective neighbourhood measurements on intensity of activity, landuse composition and street structure by using geographic information system（GIS）. The index has been widely adapted in different regions and countries for assessing associations of physical activity with built-environment. However, since available geographical information varies depending on regions and countries, it cannot be assumed that the same indices as those used in the US can be build in Japan. In addition, since WI was developed from the discussion on the premise of the suburban sprawl in the US, it is necessary to accumulate research experiences as to whether it is a useful indicator in the context of Japanese society.

Therefore, this study aims to develop the procedure to build an index of walkability with Japanese data and shows the detailed processes to compute the index in a GIS environment. This Japanese variant of WI can be computed in any parts of Japan by using currently available commercial and public data sources and GIS tools equipped with ArcGIS（ESRI Inc.）. The index is composed of three environmental measures: net population density, facility accessibility and street connectedness within a walking distance, such as 1 km, along the street network from each residential place. The walkability index is defined as the sum of standardized values of these three measures with squared transformation. We demonstrated the procedure to compute the index for all of 1,520 Basic Unit Blocks in the public health district of Saku in Nagano prefecture, Japan and confirmed that the index was an internally consistent composite indicator from the obtained values.

Keywords: walkability index, geographic information system, street network, accessibility