

都市の空間パターンに応じたネクサス効果と その環境負荷に与える影響の評価

中山俊, 藤田周, 巖網林

Nexus Effects According to Urban Spatial Patterns and Assessment of its Impact on the Environmental Load

Shun Nakayama, Amane Fujita, Wanglin Yan

The diverse spatial patterns of cities are linked to people, goods, and services, and have a significant impact on environmental impacts such as CO₂ emissions. However, it has been difficult to relate spatial patterns to environmental impacts by taking into account the nexus of synergies and trade-offs among sectors, which have recently attracted attention in the field of decarbonization. In this study, we propose a method to represent the nexus in terms of cells by organizing the interactions between food, energy, water, buildings, mobility, public services, waste, and urban space, which constitute the basis of urban life, in a matrix called the nexus matrix. We then develop an environmental index, the nexus footprint, which is the sum of the space area occupied for urban management and provision of infrastructure services and the forest area required to absorb the CO₂ emissions emitted in the process, to enable quantitative evaluation of the nexus effect. This research will enable us to quantitatively clarify the complex effects of population density, building form, household form, and other factors that constitute the diverse spatial patterns of cities on resource use, and to present an elaborate baseline for carbon net-zero and sustainable urban planning and urban design.

Keywords: 脱炭素, ネクサスフットプリント, ネクサスマトリックス

1. はじめに

脱炭素化が世界的な課題となる中、持続可能な都市化に疑問が呈されている。持続可能な都市化は、持続可能な開発目標(SDGs)の169のターゲットの一つに位置付けられており、都市研究の重要なキーワードになっている。そもそも都市の本質は、人間の社会経済活動を集中的・効率的に促進することにある。そのため、都市は空間を平面的・垂直的に拡張し、人的資本や資源を外部から流入させてきた。したがって、環境の持続可能性を達成するために社会的・経済的な生活水準を犠牲にすることは許されない。重要なのは、環境、経済、社会の各側面において、都市が麻痺や機能不全を起こすことなく、長期的にわたって健全な状態を維持することにある。これは、物理的資本、社会的資本、人的資本、自然資本は非代替的であるとする所謂「強い持続可能性」の考えとも合致している(Mori and Yamashita 2015)。

とはいえ、環境の持続可能性(environmental sustainability)は都市の持続可能性のコアである。環境の持続可能性は、1992年に世界銀行が提唱した「環境責任開発(environmentally responsible development)」が「環境的に持続可能な開発

(environmentally sustainable development)」という概念を経て昇華したものである(Moldan, Janoušková, and Hák 2012)。環境の持続可能性とは、「人間の必要性に応じて使用される原材料の供給源を保護し、人間の廃棄物の吸収源を超えないようにして、人間に害を与えないようにすることによって、人間の福祉を向上させようとするもの」とされる(Goodland 1995)。この定義からもわかるように、元来、環境の持続可能性は絶対的なものである(Fischer et al. 2007)。そのため、都市における環境の持続可能性一定の閾値によって評価されるべきである。しかし、持続可能性は複数の指標(indicator)からなる指標群(Index)で測られることが多く、相対的に評価されやすい(Tanguay et al. 2010)。ある都市が他の都市よりも持続可能であると言っても、両者がある絶対的な基準において非持続可能であれば、意味がない。重要なのは、ある都市が持続可能かどうかを判断することである。

さらに、資源供給、廃棄物の処理、生態系サービスなど、都市は地域外に依存して成立しており、単独では持続可能でないことに注意する必要がある(Bithas and Christofakis 2006; Camagni, Capello, and

Nijkamp 1998). 都市は、経済的・社会的に集積効果を追求するための空間であり、生態学的に生産性の高い未利用地はほとんど存在しない。そのため、資源消費に対する生態学的な補完機能はごくわずかであり、都市は外部地域からの支援なしでは機能不全に陥る。つまり、都市は、農村地域や地球全体に対して負の影響を与えるオープンシステムである (Munda 2006)。

しかし、強い持続可能性、絶対評価と相対評価の区別、都市の外部依存という3つの条件を同時に満たす指標は存在せず、既存の持続可能性指標を都市の文脈に当てはめることは不適切であるとされる (Mori and Christodoulou 2012)。そこで本研究では、脱炭素型まちづくりの支援が可能な指標を開発することを目的に、この3条件を考慮した持続可能性指標を構築する。本指標は行政や開発事業者による脱炭素型まちづくりを支援することを企図したものである。

2. ネクサスフットプリントの開発

強い持続可能性、絶対評価と相対評価の区別、都市の外部依存という3つの条件を同時に満たす指標は存在しないが、エコロジカルフットプリントは都市の外部依存を考慮できる絶対評価型の環境の持続可能性指標として、優れた指標と言える。そのため、エコロジカルフットプリントの長所・短所から学ぶ点は大きい。

環境の持続可能性評価指標としてのエコロジカルフットプリントが抱える課題として、経済的・社会的観点の欠落以外に、生態学的資源を網羅的に取り扱っていない点と資源間の相互作用まで考慮していない点が挙げられる。都市は、生産性や生活の質を維持しつつも脱炭素化を加速して持続可能性を高めなければならず、少なくともCO₂排出に占める割合の高い資源は持続可能性評価の対象としなければならない。2010年以降、都市生活の基本を構成する食料(F)、エネルギー(E)、水(W)は、世界全体のCO₂排出量の約70%を占めているとして注目を集めている。FEWに加えて、それらを取り巻く緑やモビリティ、建築、廃棄までの7項目を都市インフラシ

	f	e	w	b	g	m	d
F		肥料 農業 光熱	アクアポニクス			輸送 アクセス	コンポスト
E			発電用水 水素発電				
W		小水力発電			灌漑		
B	屋上菜園	PVパネル	雨水タンク		屋上緑化		
M		ガソリン 電気					
G		CO ₂ 吸収	雨水吸収				
D	バイオマス	消化ガス発電	再利用水 汚泥(建設資材)				

図1 ネクサスマトリックスのイメージ

システムとして捉えれば世界全体のCO₂排出量の約87%に達し、世界全体の水需要の約97%を占めるとされる (Ramaswami et al. 2016)。さらに、都市は経済効率のために、これらのインフラを時に集中型の大規模システムによって整備、運用してきたが、このインフラシステムは極めて複雑である。エコロジカルフットプリントはその指標のコンセプトによってこの複雑性を扱う観点と資源の網羅性はなく、効果的な記述方法、評価方法はこれまでなかった。

2.1. ネクサスマトリックス

都市においてインフラシステムがどのように複雑につながっているか、ここで整理したい。CO₂排出量の7割を占めるFEWは、都市においてそれぞれセクター別に管理されている。セクターごとに管理者も異なり、所管以外についての知見の少なさから、ネクサスへの意識も薄い。しかし本来、建物や施設セクターとセクターを繋ぐ結節点となっている。都市は非常に大量の建物や構造物があり、それらの内部や外部にたくさんのサーフェイス(表面)が存在し、使われていないものが多い。例えば、今は屋上にソーラーパネルが当たり前になっている。屋上農園や透水性舗装やグリーンカーテンも珍しくない。それによってエネルギーを補完し、水循環を改善し、ネ

クサスを形成することで、大規模集中処理システムを補完できる集中分散協調システムの形成が可能であると考えられる。そのつながりを活用すれば、ネクサスを活かした資源利用シナジー効果が期待できる。これを脱炭素化や持続可能性の機会と捉え、セクター別や地域別の取り組みで行き詰まる資源利用効率の打開策として期待されている。これはつまりネクサス思考およびネクサスアプローチと呼ばれる考え方である。

この集中分散協調システムは複雑と思われるが、「ネクサスマトリックス」を用いて簡単に記述できるようにした(図 1)。ネクサスマトリックスの行は都市を支える食料(F)、エネルギー(E)、水(W)、建物(B)、モビリティ(M)、みどり(G)、廃棄物処理(D)という7つの基幹インフラシステムを表している。また列は、地域内部から投入を表し、これも同様に食料、エネルギー、水、建物、モビリティ、みどり、廃棄物処理の7項目が存在する。両者を区別するために、列の名称を英単語の頭小文字、f, e, w, b, m, g, d で記す。外部からの提供(行)と内部の取り組み(列)がセルでつながりが発生し、ネクサスを形成する。その働きから地産地消、生態系サービスの活用、資源の循環利用が生まれて、脱炭素型のまちが形成されていく。つまり脱炭素化とは、都市内部において地産地消、生態系サービス、資源循環を促進し、地域外への依存を減らすことである。ネクサスマトリックスは都市システムを俯瞰的に見るツールで、FEW ネクサスに着手する基点を提供する。

2.2. ネクサスフットプリント

まちづくりや都市デザインは空間を対象とし、容積率や建蔽率、減歩率などはいずれも空間面積を測度としている。このことを鑑み、エコロジカルフットプリントの考えをベースに、ネクサスフットプリントは資源消費によって占有される空間面積(LF)とその過程で排出されるCO₂を吸収するために必要な森林面積(CF)を合算した指標として開発した。

$$NF = LF + CF \quad (1)$$

ここで、LFは①資源生産地、②供給処理地、③消費地という3つに類別される。都市において土地や

空間はより希少なため、高度利用が求められる。これは都市の長所ともいえる。持続可能な脱炭素まちづくりとは、この3つの空間のネクサス関係を上手に扱い、少ない資源で高い投資効果および脱炭素効果を創出することである。そこで、EFと異なりこの空間は土地に限定せず、建物のフロア面積や屋上面積なども考慮できるようにした。資源生産地とは、FEWのサービスを提供する生態学的生産地を指し示す。エコロジカルフットプリント同様、農地、牧草地、樹林地などを含み、加えて他の生態的な生産地も併せて含む。供給処理地は、都市機能を維持するための設備用地やグレーインフラが占める用地またはスペースを意味しており、消費地は居住地やオフィス空間を表す。LFは次式で表すことができる。

$$LF = (\text{資源生産地}) + (\text{供給処理地}) + (\text{消費地}) \quad (2)$$

これら3つの空間は土地の使い方、建築物の立て方、施設の置き方によって、競合または共存が発生しうる。これは従来のネクサス研究においてよく検討されており、競合を避けることはネクサスアプローチの目的の1つでもある。例えば、森林を伐採して農業生産、鉱物採集、発電所の建設などの場合、CO₂だけでなく、ネガティブなネクサス影響をもたらす。さらに、これらの土地空間は一見、環境への影響を指し示すが、都市空間において消費地を確保することは社会・経済的機会の創出にもつながる。

その結果、このようにして算出されたネクサスフットプリントはネクサスフットプリント指数に延伸することもできる。これはエコロジカルフットプリントとバイオキャパシティの関係に対応する指数である。ネクサスフットプリント指数の算出を式(3)に示した。

$$NF \text{ 指数} = \frac{NF}{(\text{実面積})} \quad (3)$$

2.3. 需要の特定

ネクサスフットプリントの算出に当たっては資源需要を正確に把握することが初手となる。本項ではどのように資源需要を測るか整理する。

都市は、人口密度、建築形態、世帯形態などの構成の結果、多様な空間パターン(spatial pattern)を形成

する。そして、この空間パターンは、ヒト・モノ・サービスの動きに影響を与え、エネルギー需要量とCO₂排出量に大きな影響を与えることが知られている。この空間パターンをどのように評価するか、都市空間の類型化を扱う学問である「都市形態学 (Urban Morphology)」を基盤に、多数の研究が蓄積している。

都市形態学は、建築から都市の各スケールにおける形態分析とその変容を捉えるもので、都市空間の変容メカニズムの解明において成果をあげてきた (関 and 佐藤 2007)。日本の建物を対象に、その物理的形状を類型化した研究として、斉藤ら、関らのものが挙げられる。斉藤らは建物高さおよび建物形状を、関らはこれに加えて屋根形状を用いた類型化を行っており、いずれも街区形態の記述のために類型化している (斉藤, 蜂屋, and 坂本 1995; 関 and 佐藤 2007)。また、建物の社会的役割を類型化したものとしては、都市計画基礎調査や国勢調査などにおける建物用途の類型化があり、多くの研究で用いられている (相, 貞広, and 浅見 2010; 横井 et al. 2010)。その上位スケールである街区の類型化では、これらの物理的および社会的な建物類型を基盤として、類型化するケースが多い。その場合、若林らや芳原らのように道路の類型化と併せた類型化が主となっている (若林, 巖, and 鈴木 2017; 芳原 and 田中 2020)。

その一方で、環境関連データの規模や解像度が多様なことや非空間的なデータが多いことなどから、空間パターンとエネルギー需要量やCO₂排出量に関連付けることは困難であると考えられてきた (Kellett et al. 2013)。しかし、近年の統計情報の精緻化やモデリング手法などの進歩により、都市形態学の知見は建築スケールから都市スケールに至る複数の空間スケールで環境負荷の推計に転用されている (飯野 et al. 2002)。さらに、環境負荷を緩和するために、空間パターンが資源利用の可能性に与える影響に関する研究も蓄積されつつある (Natanian, Aleksandrowicz, and Auer 2019)。

都市形態は、食料、エネルギー、水の需要を推定するためにも利用できる。具体的には、空間パターンが食料、エネルギー、水の需給に与える影響を綿

密に表現するために、物理的類型と社会的類型の2つの類型を使用する。まず、食料・エネルギー・水の需要と消費は、世帯規模や年齢など社会的な属性に強く影響される。他方、食料、エネルギー、水の需要を軽減するための生産ポテンシャルは、ソーラーパネルや家庭菜園を設置するための空間規模などの物理的属性によって決定される。したがって、ある街区のFEW需給のベースラインは、世帯形態と建物形態を特定することで推計可能になる。そこで、「世帯形態」を世帯人数、年齢、性別で分類し、「建物形態」を戸建とマンションで分類すると推計が容易になる。この分類の根拠は、入手可能なFEWの消費原単位データによるものである。

この作業を地区や都市レベルにまで広げると、データサイズが非常に大きくなり、手に負えなくなる。しかし、GISを利用することで作業量を軽減することができる。建物形態に関するGISデータは、日本では以下の2種類が提供されている。我が国では、地方自治体が整備している都市計画基礎調査と、ゼンリン株式会社が整備している建物ポイントデータの2種類の建物属性が付与されたGISデータがある。前者は、自治体によって分類が異なるが近年その統合に関する情報が国から提供されており、情報公開請求を通して無償で利用できる。また、細ゾーン、小ゾーンといった都市計画の単位で集計されて提供される場合も多い。後者は有料だが、分類が統一されており、より詳細である。また国勢調査など多くの統計データもGISと連動しており、これも用いることが可能である。

2.4. ネクサスフットプリントの計算手法

以上の原理をもとに、ネクサスフットプリントを定式化する。ネクサスフットプリント計算には6つのステップがある。

まず、①土地、建物、施設台帳 (インベントリ) の作成を行う。つまり、対象地域内、あるいは関わる対象地域外、に所有する土地、建物、施設の台帳を構成する。続いて②技術投入のためのカタログを整理する。これらの土地、建物、施設を活用するために社会や業界に存在する技術、その生産性、使用

条件のカタログを整理する。さらに、③土地、建物、施設のストックに技術を適用し、ネクサスを捉える。④ネクサスがどのような挙動で都市システムを形成しているか、マテリアルフローで整理する。最後に、①から④の情報をもとに⑤必要な空間面積を算出すると同時に、⑥CO₂排出量を算出する。

この⑤と⑥については次のように計算する。まず対象地域の FEW 需要 DM を捉える。続いて、外部依存先の総生産量とそれに伴うネクサスフットプリントを算出する。これにより全て対象地域の FEW 需要を賅ったときのネクサスフットプリントを NF₀ とする。しかし、実際には対象地域内における FEW の地産地消分がある。これによるネクサスフットプリントを NF_{in} とし、算出する。この対象地域における生産量を需要量より減じたものが、地域外依存量となる。この外部内部双方への依存を統合した最終のネクサスフットプリントを NF₁ とする。つまり縦に計算した NF_{out} と NF_{in} は生産ベースのネクサスフットプリントであり、横に計算した NF₀ と NF₁ は消費ベースのネクサスフットプリントである。以下に NF_{in} と NF₁ を取り出し、具体的な計算

の模式を図2に示した。

図中の i と j はそれぞれネクサスマトリックスの行と列を示している。(i,j)のセルに空間 s と技術 t が投入されるとネクサス(s,t)が創出される。技術固有の生産性 p と CO₂ 排出係数 cef によって、ネクサス(s,t)によるネクサスフロー PR_{s,t} および CO₂ 排出 cf_{s,t} が生まれる。それらは横方向に集計すると、複合的に利用する空間面積を得る。また、ネクサスフットプリントにおいて空間の重層利用を評価するために、土地・空間の種別を空間利用変数 v, それによる環境機能への影響を重層利用係数 u で表す。それぞれの定義は図2を参照されたい。このように任意のネクサスはどのように場所、技術、空間性質、都市機能の内容という4つの要素で定義できる。

これを縦横に集計することでネクサスフットプリントを計算することができる。縦方向の集計では生産ベースのネクサスフットプリントを算出でき、横方向の集計では消費ベースのネクサスフットプリントを算出できる。例えば図2のように対象内部の生産ベースのネクサスフットプリントである NF_{in} は次のように表せる。生産ベースの際は空間の重層利

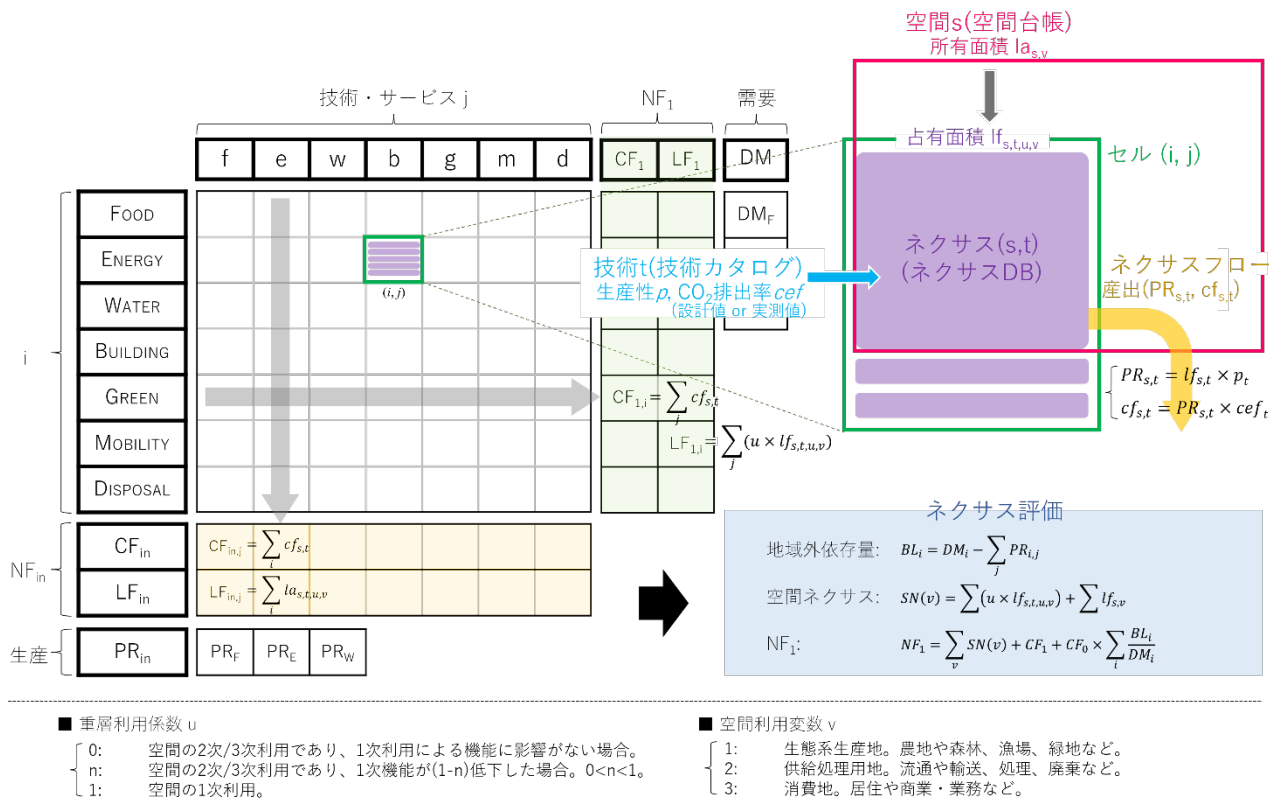


図2 ネクサスフットプリントの定式化

用は考慮しない。

$$LF_{in,j} = \sum_i lf_{s,t,u,v} \quad (4)$$

$$CF_{in,j} = \sum_i cf_{s,t} \quad (5)$$

また、対象地域内部について横方向に集計すると NF_1 が計算できる。インフラごとの LF 及び CF は

$$LF_{1,i} = \sum_j (u \times lf_{s,t,u,v}) \quad (6)$$

$$CF_{1,i} = \sum_j cf_{s,t} \quad (7)$$

と表せる。ただし、このうち $LF_{1,i}$ に域内の消費地及び供給処理用地が計上されていないことに留意する必要がある。そのため LF_1 は次のように算出される。

$$SN(v) = \sum (u \times lf_{s,t,u,v}) + \sum lf_{s,v} \quad (8)$$

つまり NF_1 は

$$NF_1 = \sum_v SN(v) + CF_1 + CF_0 \times \sum \frac{BL_i}{DM_i} \quad (9)$$

と表せる。なお、式(9)の地域外依存量 BL_i は

$$BL_i = DM_i - \sum_j PR_{i,j} \quad (10)$$

と示せる。

3. 適用事例

3.1. 対象地域

首都圏では明治以降に急速に都市化が進み、1960-80年代の高度経済成長発展期に都市域が大きく拡大した。その中、区画整理事業を伴った計画的な開発もあれば、無計画にスプロールした市街地も多い。従来では利便性、安全性などの視点から生活環境の違いを捉える研究や方法が多かったが、グローバルな視点から持続可能性を比較・評価し、データドリブンによる脱炭素型の持続可能なまちづくりを支援する方法は確立されてこなかった。都市は人口、建物が密集し、食料、エネルギー、水を高度に消費する土地だが、コンパクトな空間利用で資源効率を高めたことも認められる。つまり、資源効率と環境負荷はまちの人口構成、土地と建物の利用によって異

なることは容易に理解できる。つまり、未来の脱炭素型まちづくりはそれぞれの特性に応じた検討が必要で、ネクサスフットプリントはそのための強力な支援ツールになる。そこで、本指標の使用効果を示すために、多様な都市構造が見て取れる横浜市にこれを適用する。

3.2. データ収集

土地、建物、施設台帳として、神奈川県より提供いただいた都市計画基礎調査を用いる。都市計画基礎調査では、建物用途や土地利用のデータが個々に整備されているが、都市構造を捉える都市計画上の最小単位である細ゾーンごとに集計されたものを用いる。これには年代別人口、土地利用、建物用途別延床面積などが収録されている。

他方、技術カタログに収録すべき単位は研究対象のスケールによって異なる。建物や街区を対象とすれば、導入されている建築設備などが技術となるが、都市スケールでの評価でそこまで追うことはできない。そのため、都市スケールで考慮できるのは建物や土地利用そのものである。そこで技術カタログには、建物用途や土地利用ごとに FEW 需要を基点に整備した。食料は、国民健康・栄養調査を用いてすべて居住地に紐づけた。また、エネルギーと水については、一般社団法人日本サステナブル建築協会が整備する DECC(Data-base for Energy Consumption of Commercial buildings)および環境省の家庭部門の CO₂ 排出実態統計調査を用いた。なお、工業系の建物用途、土地利用についてはこれらのデータベースに網羅されていないため、評価の対象外とした。

また FEW の需要に至る過程については、次の通りデータを整備した。食料については、本研究が都市の脱炭素化を志向していることもあり、都市空間でも生産可能な野菜に限定して評価した。野菜の生産から流通に至るプロセスにおける CO₂ 排出量は、吉川らの研究における計算手法を採用した(吉川, 天野, and 島田 2006)。また、必要な空間面積は農林水産省の作物統計調査から算出した。電気については、東京電力および JERA の統合報告書から、ガスについては東京ガスの統合報告書から、CO₂ 排出量

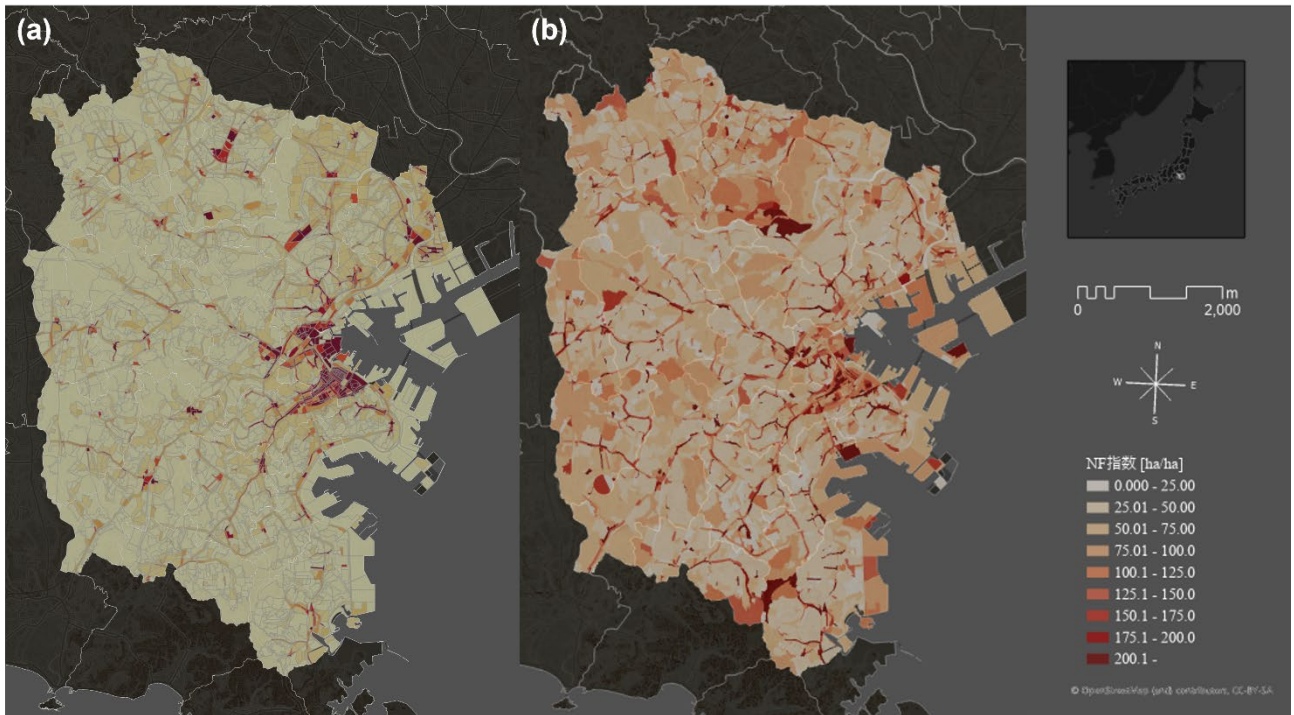


図3 ネクサスフットプリントの算出結果

と必要な空間面積を算出した。横浜市の上水道については、横浜市上水局の水道事業統計年報および横浜の水道 2021 を参照して、CO₂排出量および必要な空間面積を算出した。

3.3. 結果

図3にNF指数の算出結果を細ゾーン単位で示した。左はNF指数のための実面積として細ゾーンの面積を用いたもので、右は商業系および住居系の延床面積を用いたものである。左図からは横浜駅やみなとみらい駅、新横浜駅周辺でNF指数が高いエリアが集積していることがわかる。また道路や鉄道沿いもNF指数が高い。さらに、計画的な開発が行われてきた横浜市西部に比べると、スプロール的な開発が見られる横浜市北東部でも面的にNF指数が高くなっていることがわかる。また右図は、社会・経済的機会を生み出す消費空間に対して、NFは商業系エリアであるか、住居系エリアであるか、さほどの違いがないことを示唆している。

さらに図4には細ゾーンが小ゾーンを用途地域ごとに分割したものであることに着目し、ゾーニング別にNF指数を箱ひげ図で表現した。上が図3の左

図に対応しており、NF指数算出に細ゾーンの面積を実面積として利用している。下は図3の右図に対応しており、NF指数算出には商業系・住居系の延床面積を実面積として採用している。その結果、図4上図からは、商業地域、近隣商業地域でNF指数が高く、続いて商業機能の設置が比較的容易な準工業地域や準住居地域でも比較的高い傾向が見て取れる。その一方で、商業機能の設置が難しい第一種低層住居専用地域などではNF指数が平均的に低くなっていることが見て取れる。しかし、図4の下図に目を移すと、第二種低層住居専用地域と商業地域のNF指数がほとんど変わらないなどの様子が見て取れる。なお、上図下図共通してすべての最小値が0もしくは0に近いのは、極めて用途地域と小ゾーンのオーバーラップの結果、極めて小さい細ゾーンが発生し、建物のない細ゾーンが存在するためである。

4. 考察

現代都市は、人口集中と都市規模の拡大に伴い、多くの資源が遠方から輸入され、多くの住民が通勤・通学のために長距離移動している。その結果、環境負荷が増大している。都市本来の効率が損なわれつ

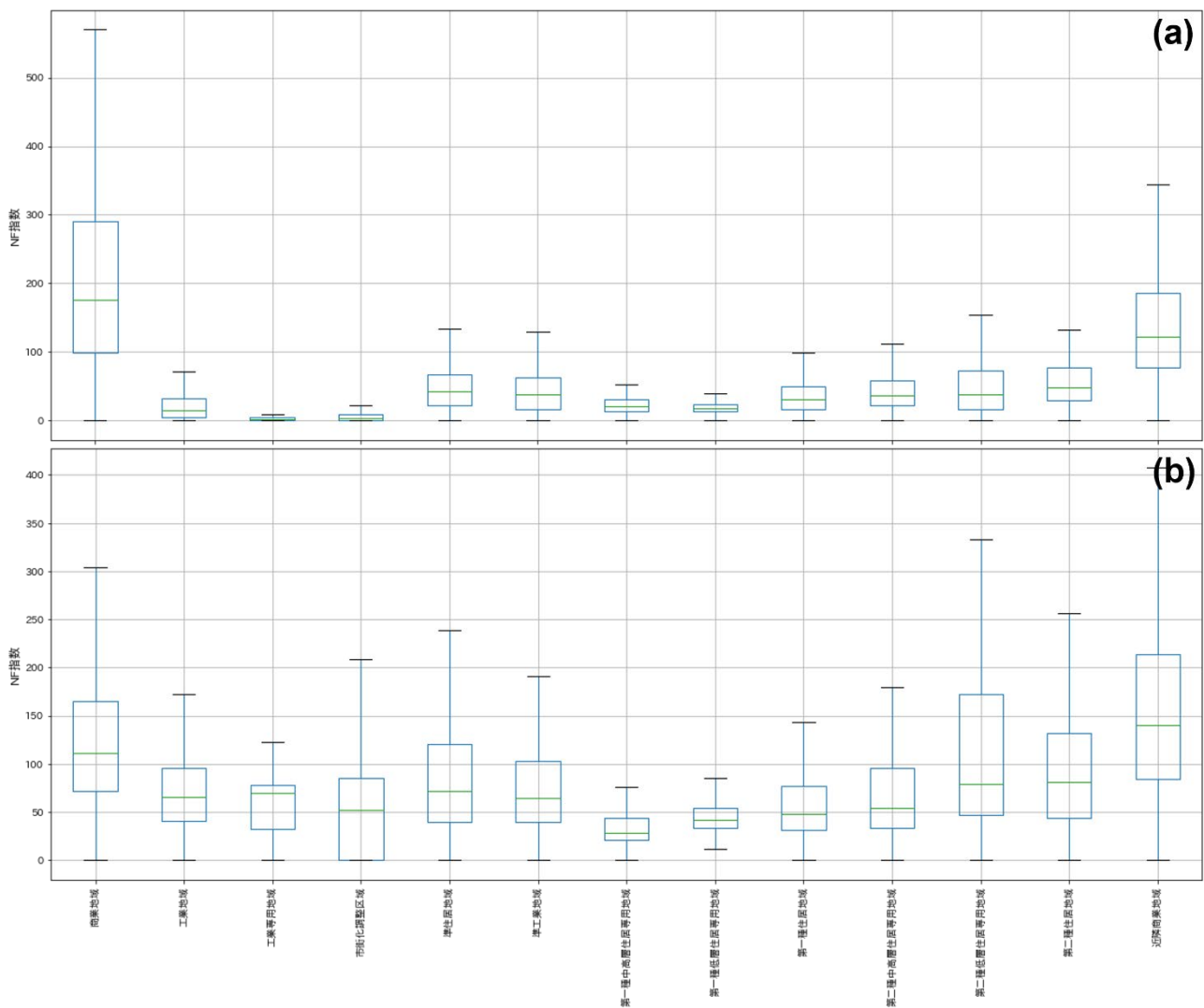


図4 ゾーニング別のNF指数

つある今、成熟化する既存都市をどう再組織化すべきか、問われている。それに対する一つの答えとして、コンパクトシティが提唱されている(Dantzig and Saaty 1973)。コンパクトシティは、店舗や職場など都市機能のノード近くに居住することで徒歩や自転車、公共交通による移動を可能とし、都市の低炭素化や都市管理の都市は、経済的・社会的に集積効果を追求するための空間であり、生態学的に生産性の高い未開発の土地はごくわずかしかな存在しない。そのため、資源消費に対する生態学的な補完機能はごくわずかしかなく、都市は外部地域からの支援なしには機能不全に陥る。コスト低下をもたらして持続可能性を実現するコンセプトである。日本のコンパクトシティでは、都市機能の集約拠点では、建築密

度が向上し、土地の高度利用が行われるケースが多くみられる。しかし、エコロジカルフットプリントに倣い図3の左図のように土地面積でネクサスフットプリントを捉えると、都市機能の集積は悪となる。しかし、都市が社会・経済の発展を最も効率的に促進する空間形態であるという基本原則に立ち返り、そのことを考慮して図3の右図のように延床面積で評価すると、土地の高度利用は必ずしも悪とは言えない。むしろ社会経済機能を提供しつつ、他のエリアと大差ない環境負荷にすることができていることは評価に値することである。このように、ネクサスフットプリントは社会経済機能の提供の側面も考慮した指標となっている。

NF 指数はエコロジカルフットプリントに倣った

絶対指数であることにも留意する必要がある。持続可能性は、経済・社会的には相対的な概念であるが、環境的には地球の限界(planetary boundary)で課された制約があるため絶対的な概念であるとも指摘されている(Rockström et al. 2009; Finco and Nijkamp 2001; Floridi et al. 2011)。図4の下図によれば、NF指数が平均的に50から100を推移していることがわかる。しかし、都市には多くの人工空間が創出されているおり、特に都心部では生態学的な生産が可能な未利用地はごくわずかである。その数少ない未利用地についても、都市空間において生態学的な生産地に転換することは経済的・社会的に許されない。その一方で、都市には大量の建物や構造物があり、その内部や外部に多く存在するサーフェイス(表面)は有効に活用されていないものも多い。都市の脱炭素化は都市内部におけるさまざまな空間や資源を活用し、地産地消、生態系サービス、資源循環を促進し、環境容量に収まるようにすること検討する必要がある。とはいえ、それらの空間も有限で経済性が悪いことも多い。そのため、地域内外あわせて考慮する必要がある。例えば、森林を切り開いて、メガソーラーというのは褒められない。ネクサスフットプリントはその機能を有するが、都市スケールでは地域内部の生産機能に関するデータが少なく取り扱えなかった。今後の課題としたい。

5. 結論

本稿では、脱炭素化の進展をセクター横断に評価可能で、持続可能な脱炭素型まちづくりの空間計画の策定支援が可能な指標体系の開発を目的に、前半では持続可能な都市化の概念規定や既存の持続可能性指標のレビューなどを通して、新指標の要件定義を行った。その結果、本研究で開発する新指標では、強い持続可能性、絶対評価と相対評価の区別、都市の外部依存、ネクサスを考慮、明示できるようにする必要性が明らかになった。

また、本稿の後半では、新指標ネクサスフットプリントの開発について論じた。まちの食料・エネルギー・水・建物・モビリティ・グリーン・廃を理という7つのインフラに着目し、脱炭素化のための都

市システムを捉えることにした。この都市システムは、基盤インフラシステムを行に、地域内の取り組みを列に、それぞれ配置した行列で記述し、ネクサスを行列のセルで表現することで簡便に扱えるようにした。そして、グローバルに使われている環境負荷指標であるエコロジカルフットプリント(EF)の発想を建物・街区に導入し、FEWを基点に建物が持続的に管理とサービス提供のために占有する空間面積とCO₂排出を吸収するために必要な森林面積を合算した持続可能性指標ネクサスフットプリントを開発した。

横浜市を対象としたケーススタディを通して、本指標の有用性を検証した。その結果、精緻な都市計画基礎調査および各インフラ企業の報告書の解読によって、都市におけるネクサス効果やCO₂削減効果を定量的、視覚的に算出できることがわかった。この手法には都市計画基礎調査が整備されていれば汎用性がある。これを用いて、環境配慮型の都市再生事業を支援することができると考えられる。さらに、ケーススタディの考察から、環境の持続可能性を評価する指標において、社会経済的視点を入れる意義、絶対指標とすることの価値が明らかになった。また、脱炭素効果を示すだけでなく、地域外部の土地や空間の使い方も含めて、問いかける指標の必要性も明らかとなった。

謝辞

本研究は、日本科学技術振興機構(JST)/Belmont Forumの「持続可能な都市化に向けた国際イニシアチブ：食料-水-エネルギーのネクサス」事業の国際共同研究「可動型ネクサス：デザイン先導型都市食料・水・エネルギー管理のイノベーション」(No.11314551)の一環として行われた。

参考文献

- Bithas, Kostas P., and M. Christofakis. 2006. "Environmentally Sustainable Cities. Critical Review and Operational Conditions." *Sustainable Development* 14 (3): 177-89.
- Camagni, Roberto, Roberta Capello, and Peter Nijkamp.

1998. "Towards Sustainable City Policy: An Economy-Environment Technology Nexus." *Ecological Economics: The Journal of the International Society for Ecological Economics* 24 (1): 103–18.
- Fischer, Joern, Adrian D. Manning, Will Steffen, Deborah B. Rose, Katherine Daniell, Adam Felton, Stephen Garnett, et al. 2007. "Mind the Sustainability Gap." *Trends in Ecology & Evolution* 22 (12): 621–24.
- Goodland, Robert. 1995. "The Concept of Environmental Sustainability." *Annual Review of Ecology and Systematics* 26: 1–24.
- Kellett, Ronald, Andreas Christen, Nicholas C. Coops, Michael van der Laan, Ben Crawford, Thoreau Rory Tooke, and Inna Olchovski. 2013. "A Systems Approach to Carbon Cycling and Emissions Modeling at an Urban Neighborhood Scale." *Landscape and Urban Planning* 110 (February): 48–58.
- Moldan, Bedřich, Svatava Janoušková, and Tomáš Hák. 2012. "How to Understand and Measure Environmental Sustainability: Indicators and Targets." *Ecological Indicators* 17 (June): 4–13.
- Mori, Koichiro, and Aris Christodoulou. 2012. "Review of Sustainability Indices and Indicators: Towards a New City Sustainability Index (CSI)." *Environmental Impact Assessment Review* 32 (1): 94–106.
- Mori, Koichiro, and Tsuguta Yamashita. 2015. "Methodological Framework of Sustainability Assessment in City Sustainability Index (CSI): A Concept of Constraint and Maximisation Indicators." *Habitat International* 45 (January): 10–14.
- Munda, Giuseppe. 2006. "Social Multi-Criteria Evaluation for Urban Sustainability Policies." *Land Use Policy* 23 (1): 86–94.
- Natanian, Jonathan, Or Aleksandrowicz, and Thomas Auer. 2019. "A Parametric Approach to Optimizing Urban Form, Energy Balance and Environmental Quality: The Case of Mediterranean Districts." *Applied Energy* 254 (November): 113637.
- Ramaswami, Anu, Armistead G. Russell, Patricia J. Culligan, Karnamadakala Rahul Sharma, and Emami Kumar. 2016. "Meta-Principles for Developing Smart, Sustainable, and Healthy Cities." *Science* 352 (6288): 940–43.
- Tanguay, Georges A., Juste Rajaonson, Jean-François Lefebvre, and Paul Lanoie. 2010. "Measuring the Sustainability of Cities: An Analysis of the Use of Local Indicators." *Ecological Indicators* 10 (2): 407–18.
- 吉川直樹, 天野耕二, and 島田幸司. 2006. "野菜の生産・輸送過程における環境負荷に関する定量的評価." *環境システム研究論文集* 34: 245–51.
- 斉藤千尋, 蜂屋景二, and 坂本一成. 1995. "東京区部における「まち」の空間構成の類型: 街区にみる建築の集合形式の研究." *日本建築学会計画系論文集* 60 (474): 123–31.
- 横井隆志, 山本祐吾, 東海明宏, and 盛岡通. 2010. "低炭素都市の形成に向けた街区更新およびエネルギー計画の統合を支援するシステム開発." *土木学会論文集G* 66 (1): 17–34.
- 相尚寿, 貞広幸雄, and 浅見泰司. 2010. "用途別の建物床面積と立地傾向の変容傾向による大都市圏駅前商店街の類型化." *都市計画論文集* 45.2: 23–29.
- 芳原拓実, and 田中貴宏. 2020. "立地的特性と物理的特性による密集市街地の類型化に関する研究." *都市計画論文集* 55 (3): 274–81.
- 若林建吾, 巖先鏞, and 鈴木勉. 2017. "東京区部における建物指標と道路指標を考慮した市街地分類に関する研究." *都市計画論文集* 52 (3): 711–16.
- 関勝炫, and 佐藤滋. 2007. "都市建築の類型による街区形態の解析に関する研究: 都市建築形態学の方法による街区計画論に関する研究(1)." *日本建築学会計画系論文集* 72 (621): 53–60.
- 飯野秋成, 梅干野晃., 尹聖皖, 塚本健二, and 円井基史. 2002. "土地利用・土地被覆に着目した都市熱環境評価のための街区の類型化: 熱帯モンスーン気候地域における都市の熱環境評価に関する研究 第1報." *日本建築学会計画系論文集* 67 (554): 55–62.