

都市のエネルギー評価指標

EHS&S 研究センター研究主任 兼 環境技術部主任 海藤 俊介

Keyword : CO₂排出量, 環境性能評価, CASBEE, LEED

1. はじめに

2018年に自治体による優れた取り組みを選定する「SDGs未来都市」制度が開始されるなど、SDGs（持続可能な開発目標）による持続可能なまちづくりの関心が高まっている。環境負荷低減の観点においては、建築物単体だけでなく、より広域の建築群、インフラを含む都市、街区といった単位における環境性能評価も必要となっている。本稿では都市のCO₂排出の傾向を分析すると共に、都市、街区を対象とした評価ツールにおけるエネルギー評価指標の概要を紹介する。

2. 都市のCO₂排出傾向

2.1 全国・県庁所在地の都市由来のCO₂排出量

我国における年間CO₂排出量は、2018年度において11億3,800万 ton-CO₂である。産業部門が多く立地する工業系都市においては商業系都市などに比べてCO₂排出量

が多くなる傾向にあるが、ここでは都市活動に起因するCO₂排出として民生部門（「家庭」「業務その他」）、運輸部門を対象とする。民生部門の「家庭」は冷暖房・給湯、家電の使用など、「業務その他」は商業・サービス・事務所での冷暖房やOA機器の使用などから発生するCO₂排出が該当する。

都市由来のCO₂排出量は、日本全体のおよそ50%である（図1）。県庁所在地および東京23区の都市由来のCO₂排出量は、人口200万人以上の都市が上位を占めている（図2）。

2.2 都市を構成する建物用途別面積

都市を構成する建物用途の延床面積を把握するため、建築物のストック面積に着目する。

建築物ストック統計から全国の建築物のストック面積は、住宅が全体の約68%、非住宅が約32%を占める（図3）。

都市由来のCO₂排出量上位10都市における建築物スト

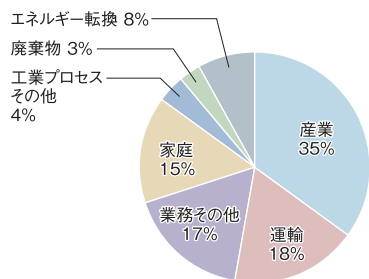


図1 日本全国のCO₂排出量の内訳(電気・熱配分後)(2018年度)²⁾

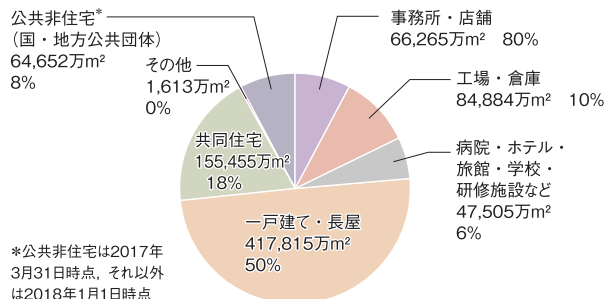


図3 建築物ストック面積 (2018年)⁵⁾

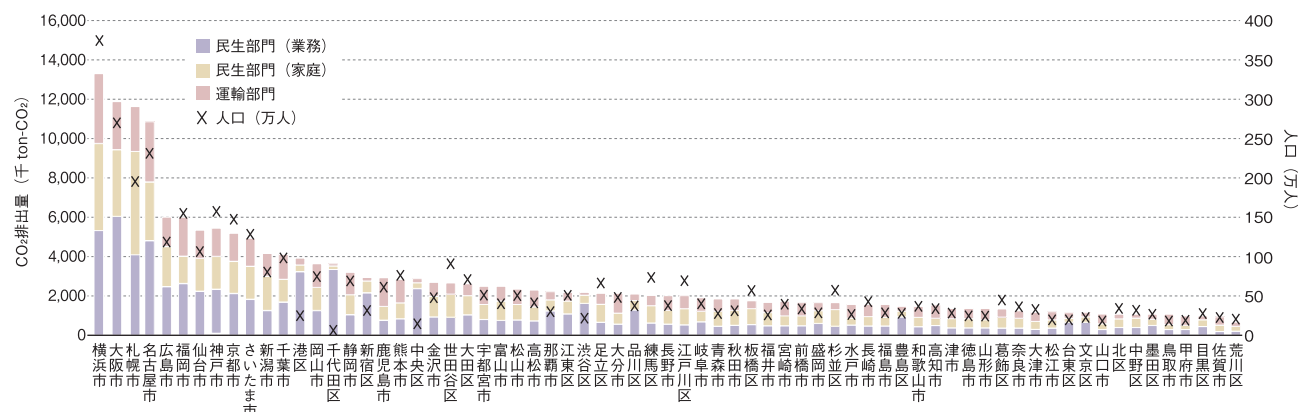
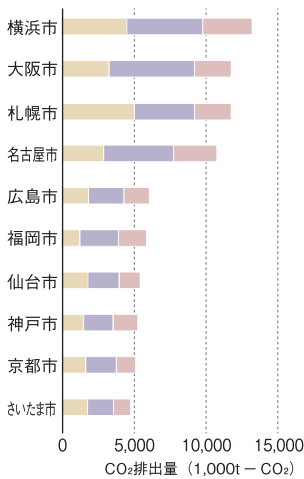
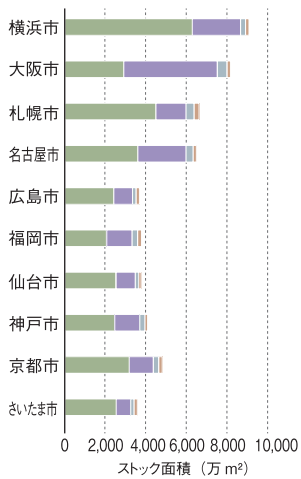


図2 県庁所在地・東京23区の都市由来のCO₂排出量 (2018年度)^{3,4)}

都市由来のCO₂の排出量



建築物ストック面積



建築物ストック面積の用途割合

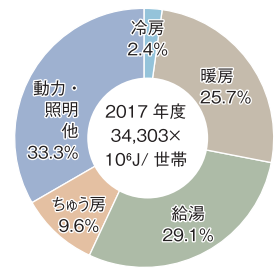
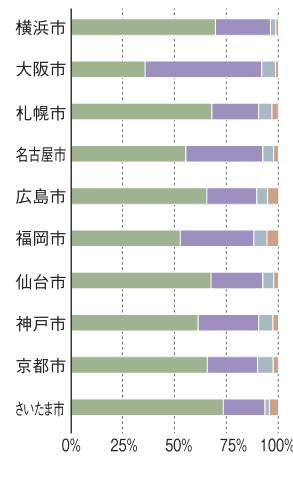


図5 世帯当たりの用途別エネルギー消費 (2017年度)⁷⁾

図4 都市由来のCO₂排出量上位10都市の建築物ストック面積 (2018年度)⁶⁾

ック面積と用途割合をみると、横浜市、札幌市のような住宅のストック面積の割合が高い都市において家庭のCO₂排出量が大きい傾向がみられる(図4)。特に札幌市は建築物ストック面積当たりのCO₂排出量が多い。暖房のエネルギー消費が多いことが要因として考えられる。

2.3 民生部門のCO₂排出

1) 住宅建築

住宅における世帯当たりの用途別エネルギー消費は、空調(冷房、暖房)30%程度、給湯30%程度、その他(動力・照明他、ちゅう房)40%程度の割合である(図5)。

空調については冷房よりも暖房の需要が多い傾向がある。

坊垣ら⁸⁾は、全国8都市域で実施した夏期および冬期のエネルギー消費と住まい方・環境意識等のアンケートを取り、暖冷房環境に関する検討結果を報告している。アンケート結果を基に算出した全国8都市の暖房日数と冷房日数から、那覇を除き、冷房日数よりも暖房日数が多い傾向がみられた。暖房日数/冷房日数はそれぞれ札幌：190日/40日、仙台・新潟：150日/50日、東京・名古屋・京都・福岡：120日/70日、那覇：70日/100日であった。

前述の論文は約20年前の発表であることから、直近の2018年の気象データを使用して冷暖房の必要な日数の目安を把握した。日平均外気温が24℃以上となる日を冷房、18℃以下となる日を暖房が必要であると仮定して県庁所在地別に2018年の年間の冷暖房日数の割合を算出した(図6)。冷房日数は年間の30%未満、暖房日数は年間の50%以上となる県庁所在地が大半であり、2018年においても冷房日数よりも暖房日数の方が長い傾向がある。

2) 非住宅建築

非住宅建築においては、用途によりエネルギー消費量

の傾向が異なる。事務所用途では、建物規模とエネルギー消費量の傾向が過去研究で示されている。

井城ら⁹⁾の研究では、全国の事務所建物における調査結果からエネルギー消費量の月別変動パターンより基本負荷と変動負荷を定義し、原単位化を行っている。月別エネルギー消費量の極小値をベースラインとしてこれより小さい年間エネルギー量を「基本負荷」、ベースラインからの増加を「変動負荷」と定義している。研究結果より基本負荷原単位は延床面積が大きくなるに従い、増加することが示されている。また、夏期変動負荷原単位も延床面積が大きくなるに従い増加する傾向があるが、冬期変動負荷原単位は延床面積が大きくなるに従い減少する傾向があることが示されている。

許ら¹⁰⁾の研究では、東北地方の商業施設を対象にエネルギー消費量を分析しており、スーパー、家電量販店の冷暖房エネルギー消費量と冷暖房デグリーアワーについて強い相関を確認している。

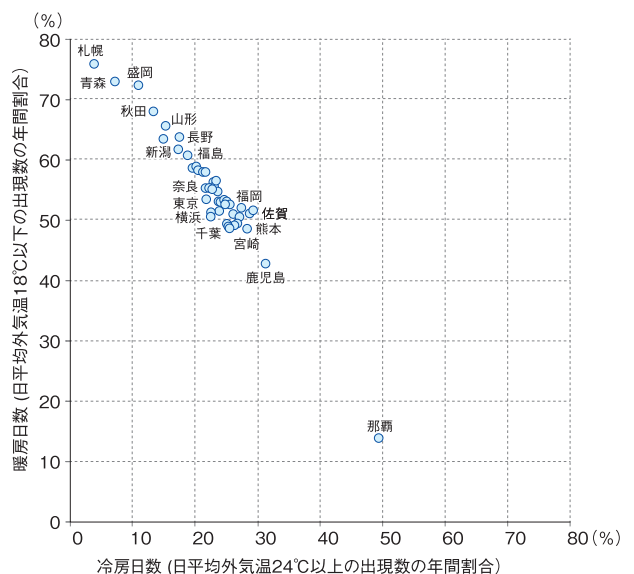


図6 県庁所在地の冷房日数と暖房日数の年間割合の相関(2018年)

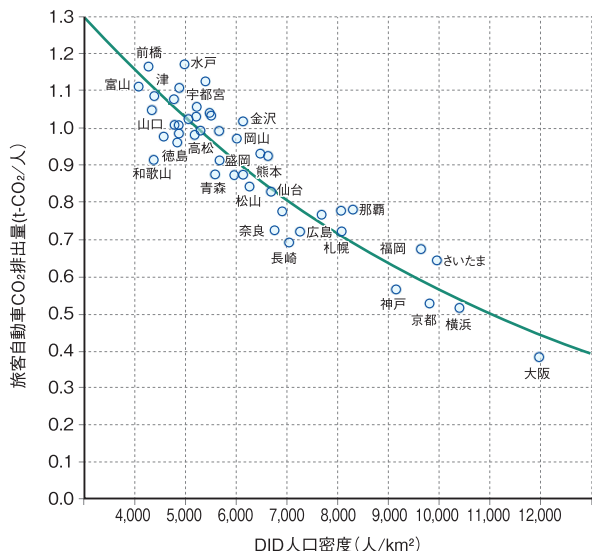


図7 県庁所在地の集中地区人口密度と1人当たりの旅客自動車のCO₂排出量の相関(2018年)

3) 熱供給事業者の冷温熱販売量の傾向

地域冷暖房を行っている熱供給地点において大半の地区では冷熱販売量が温熱販売量を上回る傾向にある¹¹⁾。一部の寒冷地(北海道、東北)や住宅中心の地区では冷熱販売量より温熱販売量が多いが、基本的に事務所や商業施設へ熱供給する事業者が多いことから温熱販売量よりも冷熱販売量が多い傾向がある。

2.4 運輸部門のCO₂排出

運輸部門のCO₂排出量は、輸送機関別では自動車が約9割を占める。図7より人口集中地区(Densely Inhabited Districts: DID)の人口密度が低い、すなわち、都市化が進んでいない地区ほど旅客自動車のCO₂排出量が大きくなる傾向がみられる。

運輸旅客のエネルギー消費量を削減する方法として公共交通への転換やコンパクトシティの推進などが挙げられる。

3. 評価ツール

3.1 代表的な「都市・街区の評価ツール」

表1に代表的な「都市・街区の評価ツール」を示す。

3.2 評価ツールにおけるエネルギー評価

本節では、都市、街区のスケールを対象とした環境性能評価システムであるCASBEE、LEEDの建物のエネルギー消費量に関する評価概要を紹介する。

1) CASBEE-都市, CASBEE-街区

CASBEE-都市, CASBEE-街区は、都市または街区の環境性能を、環境、社会、経済のトリプルボトムラインで総合的に評価するシステムである。評価方法は、環境品質・活動度Q(Quality)を高める性能と、その外部への環境負荷L(Load)を削減できる性能の両側面から

表1 代表的な「都市・街区の評価ツール」

	評価ツール	発表者	最新版(初版)発表年
都市評価	CASBEE-都市 (Ver 1.03)	(一財) 建築環境・省エネルギー機構	2013 (2011)
	LEED for Cities and Communities (Ver 4.1)	The U.S. Green Building Council, Inc.,	2021 (2017)
	二酸化炭素削減効果シミュレーション・ツール (CO ₂ -Reduction Effect Simulation Tool: CREST)	国土交通省都市局都市計画課	2019 (2014)
	地方公共団体実行計画(区域施策編)策定・実施マニュアル	環境省	2021
	都市構造の評価に関するハンドブック	国土交通省都市局都市計画課	2014
街区評価	CASBEE-街区 (Ver.1.01, CASBEE-まちづくりより改称)	(一財) 建築環境・省エネルギー機構	2014 (2007)
	Living Community Challenge (Ver 1.2)	International Living Future Institute.	2017
	LEED for Neighborhood Development (Ver 4)	The U.S. Green Building Council, Inc.,	2018 (2007)
	BREEAM Communities	Building Research Establishment (UK)	2012 (2009)
	Green Star Communities (Ver 1.1)	Green Building Council of Australia	2016 (2011)
	Ecoquartier・Ecolabel	フランス環境連帯移行省 (Ministère de la Transition écologique)	2012
	APEC Low-Carbon Town Indicator System	APEC	2014
	ISO/TC 268/SC 1 Smart community infrastructures	ISO	2020
	EcoDistricts Protocol	EcoDistricts	2016 (2008)

表2 CASBEE-都市(標準版)の環境負荷Lの項目

評価項目		入力値
L.1 エネルギー起因温室効果ガス排出量	1.1産業部門 1.2民生家庭部門 1.3民生業務部門 1.4運輸部門	いずれも当該都市での年間排出総量(t-CO ₂ /年)を計算し、その後補正人口1人当たりの排出量(t-CO ₂ /(人・年))を計算する
L.2 エネルギー起因以外の温室効果ガス排出量	2.1廃棄分野その他	

評価し、その結果を環境効率BEE (Built Environment Efficiency)として指標化し、評価する。

CASBEE-都市は、公開統計情報を参照することによって労力をかけずに、簡易に自治体の環境性能を把握することが可能な「標準版」と、都市計画や将来に向けて施策を立案する際に使用することを想定し、より細かく自治体の環境性能を把握(予測)することができる「詳細版」のツールが用意されている。

表2にCASBEE-都市(標準版)の環境負荷Lの項目構成を示す。いずれも当該都市でのCO₂の年間排出総量(t-CO₂/年)を計算し、その後補正人口1人当たりの排出量(t-CO₂/(人・年))を計算する。

CASBEE-街区は、「Q3経済」「3.3.2エネルギーシステム」「3.3.2.1需給システムのスマート化」において

CEMS (Community Energy Management System: 地域エネルギーマネジメントシステム) や再生可能エネルギーの活用について評価している (表3)。

環境負荷Lについては、LR_{UD} (環境負荷低減性) として評価する。対象プロジェクトに起因する温室効果ガス排出量を算定し、そのBAU値 (Business As Usual, 特段の施策を施さない場合の趨勢値) と比較した「施策後」の削減率によることとしている。表4に示す項目を記入することでBAU値と施策値が求まる。

2) LEED for Cities and Communities, LEED ND

自治体などを認証するLEED for Cities and Communitiesは、形態、規模、新規開発、既存エリアにかかわらず都市やコミュニティに適用可能である。公共、民間の開発主体によらず、適用可能となるように制度設計されており、自治体、プランナー、ディベロッパーに利用されることを想定している。段階として既存/計画段階、規模

表3 CASBEE-街区のエネルギー関連の評価項目

Q3 経済
3.3 効率性・合理性
3.3.2 エネルギーシステム
3.3.2.1 需給システムのスマート化
1) エネルギーの需要・価格の変動に対する柔軟性
①スマートメーター: スマートメーターが導入されている
②BEMS, HEMS: 各建物でBEMS, HEMSが導入されている
③CEMS: 街区全体でCEMSが確立されている
④再生可能エネルギー, 未利用エネルギー: 活用されている
⑤その他の取り組み: その他の先進的な取り組みや事業スキームがある
3.3.2.2 更新性・拡張性
1) 街区全体としての中長期的な更新・拡張の容易性
①配管・配線材料: 更新期間が長い配管・配線材料が選択されている
②共同溝: 共同溝がある
③その他の取り組み: その他の先進的な取り組みや事業スキームがある
L 街区の環境負荷
LR 街区の環境負荷低減のスコア (5点満点)
1 交通分野 BAU, 施策後
2 建築分野 BAU, 施策後
3 みどり分野 BAU, 施策後

表4 CASBEE-街区の環境負荷Lの記入項目

1. 対象都市
2. 建物街区の概要の入力: 用途別延床面積の構成を現在, 将来で記入
3. 最寄の鉄道駅までの距離
4. 滞在人口の試算: 施設種類別に延床面積, 在室人数(人/m ² 日), 補正値を乗じて算出
5. 電力のCO ₂ 排出係数の決定
6. 建物の省エネルギー対策 CO ₂ 排出量の削減率は, 以下の方法から一つを選び, 算定
①実績値からの算定 既往街区の状況をそのまま評価する場合
②目標削減率からの算定 将来的な省エネルギーの目標にて評価を行う場合
③導入した省CO ₂ 対策の自らによるシミュレーションによる算定 公的な公開プログラム等により建設予定建物のCO ₂ 排出量を算定した場合
④導入した省エネルギー対策からの概算 特に実績や計算結果, 目標値などが無い場合は, 導入予定の環境対策の適用率を選択
7. 緑化面積の入力

としてシティー/コミュニティの組み合わせにより, 4通りの認証プログラムが選択できる。必須項目(Prerequisite)と選択項目(Credit)のポイント数によりLEED認証レベルが決まる。なお, 国内では札幌市がプラチナ認証を取得している。

エネルギー評価は, 「エネルギーと温室効果ガスの排出」のカテゴリーが該当する。必須項目において対象エリアの温室効果ガス排出のパフォーマンスを1人当たりの温室効果ガス排出量で評価している (表5)。選択項目「エネルギー効率」では, 街灯の発光効率, 上下水道のポンプ効率, 地域エネルギーシステムによって供給される冷暖房, 電力の総需要に対する割合を評価している。

LEED for Neighborhood Development (LEED ND) は, 新規の土地開発および再開発に適用される。居住施設の有無によらず, 企画段階から建設段階のいずれの段階でも申請可能である。なお, 国内では, 二子玉川東再開発(二子玉川ライズ, 世田谷区立公園) がゴールド認証を取得している。

エネルギー評価は, 「グリーンなインフラと建物」のカテゴリーが該当する (表6)。必須項目および選択項目である「認証グリーンビルディング」は, プロジェクトの建物がLEED認証または第三者認証機関による認証を取得しているか, 総延床面積に対する認証建物の延床面積の割合などで評価する。また, 必須項目, 選択項目である「最低限必要なエネルギー性能」における選択肢1「建物全体のエネルギーシミュレーション」では, 非住宅建築のエネルギー基準である「ANSI/ASHRAE/IESNA standard 90.1-2010 “Energy Standard for Building

表5 LEED for Cities and Communities (Plan & Design) のカテゴリー「エネルギーと温室効果ガスの排出」の項目

必須項目	
電力接続, 信頼性とレジリエンシー	
選択肢1	外部損傷防止
選択肢2	電源システムの強化
選択肢3	電力ケーブル地中化, 電力の保証と回復力
エネルギーと温室効果ガス排出の成績	
※1人当たりの温室効果ガス排出量 (1人当たりのCO ₂ トン) で評価	
選択項目	
エネルギー効率	
選択肢1	街路照明と公共エリア照明
選択肢2	上下水道
選択肢3	地域エネルギーシステム
再生可能エネルギー	
※使用する再生可能エネルギーの種類 (オンサイトなど) により評価	
低炭素経済	
※温室効果ガス(GHG) 原単位=総GHG / 総GDP (Cityのみ対象)	
電力網調和	
選択肢1	負荷管理
選択肢2	デマンドレスポンス
選択肢3	ネットメータリングおよび相互接続ポリシー

表6 LEED ND(Plan)のカテゴリー「グリーンなインフラと建物」の項目

必須項目	
認証グリーンビルディング	
最低限必要なエネルギー性能	
選択肢1	建物全体のエネルギーシミュレーション
選択肢2	規範的コンプライアンス： ASHRAE 50%Advanced Energy Design Guide
選択肢3	規範的コンプライアンス： Advanced Buildings Core Performance Guide
屋内の水使用量削減	
建設活動による汚染防止	
選択項目	
認証グリーンビルディング	
選択肢1	居住可能な建物が10棟以下のプロジェクト
選択肢2	すべての規模のプロジェクト
最低限必要なエネルギー性能	
選択肢1	建物全体のエネルギーシミュレーション
選択肢2	規範的コンプライアンス： ASHRAE 50%Advanced Energy Design Guide
屋内の水使用量削減	
屋外の水使用量削減	
選択肢1	灌漑の不適用
選択肢2	灌漑の削減
建物の再利用	
歴史的資源の保存と再利用	
敷地の最小限の開発	
選択肢1	以前の開発範囲
選択肢2	未開発範囲の割合
雨水管理	
ヒートアイランド現象の抑制	
選択肢1	屋根以外の部分（歩道など）
選択肢2	高反射率および緑化屋根
選択肢3	選択肢1,2の組み合わせ
太陽方位	
選択肢1	開発ブロックの向き
選択肢2	建物の向き
再生可能エネルギーの創出	
地域冷暖房	
インフラのエネルギー効率	
排水管理	
リサイクルおよび再利用材料を使用したインフラ	
固形廃棄物管理	
光害の削減	

Except Low-Rise Residential Buildings”に基づいて計算したベースラインのエネルギー消費量と比較して、新築で5%、大規模改修で3%の改善がなされているかで評価する。選択肢2、3では「ASHRAE 50%Advanced Energy Design Guide」の空調、給湯、その他の規定に準拠しているかで評価する。

選択項目「地域冷暖房」では、地域冷暖房システムによりプロジェクトの年間冷暖房消費量の80%以上を供給可能かで評価する。

3.3 評価指標の国際標準化 (ISO/TC 268/SC 1)

「スマートな都市インフラ」の評価指標の国際標準化

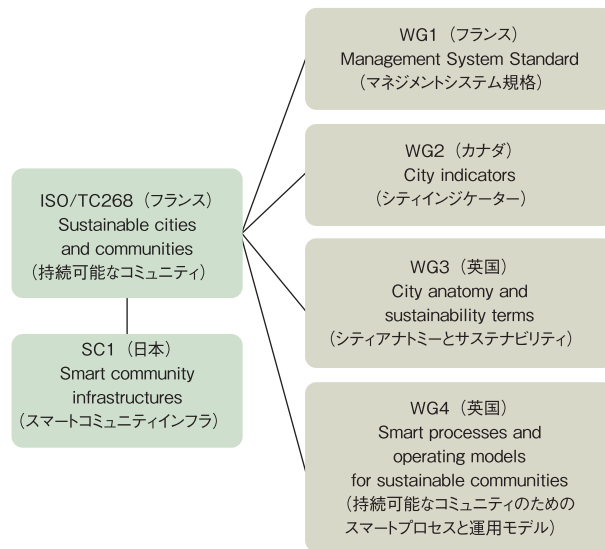


図8 ISO第268技術専門委員会の構成(2021年4月時点)^{14,15)}

表7 ISO/TC 268/SC 1 分科会¹⁶⁾

分科会	タイトル	コンビナー
WG1	Infrastructure metrics (スマート都市評価指標)	日本
WG2	Integration and interaction framework for smart community infrastructures (都市インフラ連携フレームワーク)	日本
WG3	Smart transportation (スマート交通)	日本
WG4	Data exchange and sharing for smart community infrastructures (情報共有・利用)	中国
WG5	Power plant (電力インフラ)	日本
WG6	Disaster risk reduction (防災)	日本
TG2	Smart Community Infrastructure - Pilot Testing (パイロット実証都市)	中国

が日本主導で進められている。この評価指標は、ISO/TC 268/SC 1 スマート都市インフラ (Smart community infrastructures) であり、都市インフラ (上下水、交通、エネルギー、情報通信、廃棄物処理等) を総合的に評価する指標である。2012年2月に制定されたISO/TC 268の構成は、フランス提案の都市行政の質に関するマネジメント規格を主題とした技術専門委員会 (Technical Committee:TC) の下に日本の「スマートな都市インフラ」の評価指標に関する小委員会 (Subcommittee:SC) が置かれている (図8)。

ISO/TC 268/SC 1の組織構成として幹事国は日本であり、Pメンバー (議決権を有する加盟機関) : 26カ国、Oメンバー (オブザーバー参加機関) : 17カ国である (2021年1月15日時点)。表7に分科会を示す。

4. ライフサイクル評価

工業製品だけでなく建物においてもライフサイクルアセスメント (Life cycle assessment:LCA) 手法の導入が進められている。LEED, BREEAMなどの建物環境性能評価システムにおいてLCAの評価項目が設けられている。

建物のライフサイクルにおけるライフステージのうち、「製造過程」における環境負荷の評価が普及している。「製造過程」は使用する建材や製品における原材料の採掘、輸送、材料製造、最終製品化、部品組立などが該当する。近年、これらの製造過程のエネルギー消費や温室効果ガスの排出などの環境情報の明示が評価基準に取り入れられている。欧米で普及が進んでいる環境ラベルの制度である環境製品宣言 (Environmental Product Declarations: EPD) では、ISO 14025に基づき、定量的な製品環境負荷データを開示する必要がある。LEED、BREEAMは、環境製品宣言取得部材の採用による評価が可能である。

5. おわりに

本稿では都市のCO₂排出の傾向を分析すると共に、都市、街区を評価対象とした評価ツールのエネルギー評価指標の概要を紹介した。

都市、街区のスケールでは、建物単体のエネルギー効率化だけでなく、まち全体のエネルギー消費が全体最適となる設計、運用が求められる。ハード面では、コジェネレーションシステムなどの自立・分散型エネルギーを導入し、複数建物間を熱導管や電力自営線でつなぎ、エネルギーの面的利用を行う方法がある。ソフト面では、CEMSといった地域エネルギーマネジメントシステムを導入する方法がある。近年のAIの発展に伴い、冷暖房負荷予測精度が向上している。

今後もまちづくりにおけるハード、ソフト両面の技術動向、環境性能評価の動向について注視していきたい。

[参考文献]

- 1) 日本建築学会：都市の環境設備計画, 2020.4
- 2) 環境省：温室効果ガス排出・吸収量等の算定と報告～温室効果ガスインベントリ等関連情報～2018年度（平成30年度）温室効果ガス排出量, <http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/emissions/results-h30.html>, 2021.4.15
- 3) 環境省：部門別CO₂排出量の現況推計 全項目一覧2018年度, https://www.env.go.jp/policy/local_keikaku/tools/suikai2.html, 2021.4.15
- 4) 政府統計の総合窓口：平成27年国勢調査/人口等基本集計, https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&stat_infid=000031473210, 2021.4.15

- 5) 国土交通省：建築物ストック統計の公表について, https://www.mlit.go.jp/report/press/joho04_hh_000785.html, 2021.4.15
- 6) 大阪市：大都市比較統計年表（建物及び住居）, <https://www.city.osaka.lg.jp/toshikeikaku/page/0000179680.html>, 2021.4.15
- 7) 資源エネルギー庁：<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2019html/2-1-2.html>, 2021.4.15
- 8) 坊垣和明ほか：全国的調査に基づく住宅の暖冷房時間および暖冷房期間に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第63巻, 第509号, pp.41～47, 1998.7
- 9) 井城依真ほか：事務所建物のエネルギー消費原単位の推定に関する研究－非住宅建築物の環境関連データベースにおける平成21年度調査データによる分析－, 日本建築学会環境系論文集, 第77巻, 第673号, pp.203～211, 2012.3
- 10) 許雷ほか：東北地方における建物のエネルギー消費特性に関する実態調査（その14 商業施設におけるエネルギー消費分析）, 日本建築学会東北支部研究報告集, 第73号, pp.13～16, 2010.6
- 11) 一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センター：蓄熱WEB講座PRO解説コラム, https://www.hptcj.or.jp/Portals/0/data0/hp_ts/ts_course_pro/column/c_06_01.html, 2021.4.15
- 12) 森田紘圭：都市の環境性能評価手法に関する文献レビュー, Journal of Life Cycle Assessment, Vol.11 No.1 January, pp.41～45, 2015.4, https://www.jstage.jst.go.jp/article/lca/11/1/11_41/_pdf, 2021.4.30
- 13) Green Building Japan：<https://www.gbj.or.jp/leed/ratingsystems/leed-for-cities-and-communities/>, 2021.4.30
- 14) 河野通長：Smart Cityをめぐる国際標準化と日本の役割, 計測と制御, 第57巻, 第2号, 2018.2
- 15) 一般社団法人建築・住宅国際機構 (IIBH)：<http://www.iibh.org/tc268.htm>, 2021.4.30
- 16) 日本規格協会グループ：https://webdesk.jsa.or.jp/common/W10K0500/index/dev/iso_tc268_scl/, 2021.4.30



かいどう しゅんすけ
海藤 俊介

EHS&S 研究センター研究主任 兼 環境技術部主任
環境・エネルギー等のコンサルティングに従事
博士(工学)
日本建築学会会員