デジタルツイン技術を活用したCO2削減モデルの可視化による脱炭素の推進検討

塚本祐樹[1]・廣永茂雄[1]・神馬和歌子[2]・東 修[3]・西村想[4]

[1]アジア航測株式会社 環境部（〒215-0004 神奈川県川崎市麻生区万福寺1-2-2新百合21ビル8階）
[2]アジア航測株式会社 社会基盤システム開発センター（〒215-0004 神奈川県川崎市麻生区万福寺1-2-2新百合21ビル7階）
[3]株式会社エックス都市研究所中部事務所（〒460-0008 愛知県名古屋市中区栄二丁目4番3号TOSHIN広小路本町ビル1階）
[4]株式会社エックス都市研究所東北事務所（〒980-0021 宮城県仙台市青葉区中央二丁目10番12号仙台マルゼンビル5階）

わが国有数の業務集積地を持つ大阪市では，オフィスビルを含めた業務部門において温室効果ガス排出量を2030年度までに61%削減という目標を掲げている．目標達成に向けた具体的な取組方針が必要となる一方で，地域性を踏まえたオフィスビルのCO2排出量の実態，有効な省エネ・再エネ対策効果の整理，民間事業者等への行動変容を促すための情報発信が課題であった．

本稿では，CO2削減モデルの構築と可視化の検討によりCO2排出量削減効果を評価し，今後の脱炭素の推進に向けた施策検討や情報発信のためツールを開発した．

Key Words ：デジタルツイン,CO2排出削減効果，省エネルギー，再生可能エネルギー

１．はじめに

わが国では，2050年カーボンニュートラル宣言に基づく脱炭素社会の実現に向けた様々な取組が進められている．将来的な目標達成に向け，業務部門では建築物に対するZEB基準の省エネルギー（以下，省エネ）性能の確保や再生可能エネルギー（以下，再エネ）の導入拡大等の更なる取組の充実が求められている．そのため，建築物を所有する民間事業者の役割は大きく，地方公共団体においては目標達成に向けた効果的な対策内容の検討や民間事業者への情報発信等の支援が求められる．

本検討の対象である大阪市は，国内有数の業務集積地を持ち，業務部門の温室効果ガス排出量が多くを占める．また，大阪市地球温暖化対策実行計画（区域施策編）では，2030年度までに温室効果ガス排出量を50%削減，2050年までに実質ゼロとする「ゼロカーボンおおさか」を目標に掲げている．特に,オフィスビルを含めた業務部門においては，2030年度までに61%削減を目指している．

２．現状と課題

大阪市では，オフィスビルを含めた業務部門のCO2排出量削減目標の達成に向け,具体的な取組方針を定め，実行していく必要があるが，以下のような課題がみられた．

1点目は，市内に分布するオフィスビルの規模，竣工年，業務形態などに応じたCO2排出量の実態が整理されていないため，把握する必要がある．大阪市の地勢や気候等の地域性を考慮したうえで，建築物が消費するエネルギー量やCO2排出量の推計が求められる．

2点目は，2050年までの期間を想定した際に，有効となる省エネ・再エネ等の対策効果が把握できていないため，将来的な技術動向などを考慮した対策内容と効果，目標達成に必要な各対策の組合せ，優先順位の検討などが重要となる．

特に，オフィスビルでは今後普及すると考えられる壁面や窓に設置が可能なペロブスカイト太陽電池の導入効果の把握についても重要な観点となっている．

3点目は，民間事業者等の自発的な取組促進や，市民の消費行動の転換を図っていくことが不可欠だが，一般の方にもわかりやすい形での情報整備や周知普及等が進んでいない。省エネ・再エネ等の対策効果を2D，3D地図などの活用により可視化することで，行動変容を促すためのわかりやすい情報発信が求められる．

３．CO2削減モデルの可視化検討（ツールの開発）

現状と課題を踏まえ，本検討では大阪市のオフィスビルにおけるCO2排出量の実態や，2050年までの省エネ・再エネ等の対策効果を可視化するツールを開発した．本ツールは，デジタルツイン技術を活用し，2050年までの大阪市全域におけるエネルギー消費量，CO2排出量，CO2排出削減量(2013年度比)を推計可能とした．自治体職員にも扱えるよう簡易操作性重視のもと，省エネ・再エネ等の対策をパラメータとして自由に選択する機能を設けることで，多様な対策の組合せにおける2050年までのCO2排出削減量のシミュレーションを可能とした．また,結果を2D，3D地図と連携させることで任意の場所におけるCO2削減効果も可視化でき，視覚的なわかりやすさも追求した．

(1) CO2削減モデルの検討

CO2削減モデルとして，**図-1**に示す処理フローを検討した．2050年までのCO2排出量削減効果を評価するため，まずは実態把握のための建物用途別・竣工年代別エネルギー消費原単位を設定した．次に建築物の建替え，大幅改修，空調・照明等設備更新の更新スケジュールを検討し，2050年までに起こりうる各更新タイミングにおける省エネ・再エネ導入等をパラメータとして設定した．さらに，削減目標の達成に向けた有効な省エネ・再エネ効果を検討するために，各種パラメータの組合せによる複数のシナリオを設定し，CO2排出削減量を推計した．

以上より，推計した結果と2050年削減目標との比較，パラメータごとの削減量を明らかにすることで，CO2排出量削減効果を評価した．

なお，本検討では大阪市全域（250ｍメッシュ単位），都市再生緊急整備地域（街区単位）を対象に，各単位の建物用途別・竣工年代別の延床面積，1F床面積，建物棟数をインプットデータとして用いた．建物用途は，オフィスビルに含まれる事務所，店舗（百貨店），店舗（百貨店以外），遊興娯楽，宿泊，運輸倉庫，医療厚生及びその他の計8区分とした．

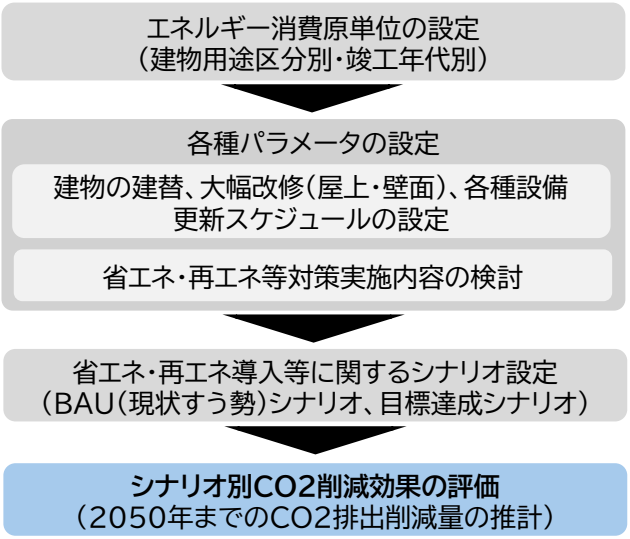

図-1　CO2削減モデル（推計フロー）

a) 地域特性を踏まえた建築物のエネルギー消費原単位の設定

オフィスビルのエネルギー消費量の実態を把握するため，本検討では（一社）日本サステナブル建築協会のDECCデータ（Date-base for Energy Consumption of Commercial building）を基に建物用途別，竣工年代別に整理した．大阪市の地域特性を踏まえたエネルギー消費原単位（MJ/年/m2）とするために，近畿地方のDECCデータを抽出したうえで，大阪市内のビルオーナーを対象としたアンケート調査結果を反映し，実態に近い数値を設定した．

b) 各種パラメータの設定

2050年までの省エネ・再エネ等対策の効果を把握するために，将来的な建築物及び設備更新等のイベント周期と対策実施内容を検討した．

イベント周期については，既存文献や市内ビルオーナーへのヒアリング調査結果から**表-1**のとおり設定した．建築物の竣工年代とあわせて整理することで，将来のイベント発生状況を推計できるようにした．

表-1　建築物の建替や設備更新による周期設定

イベント		周期	考え方
建替		30～100年	・日本建築学会等の既存文献より設定 ・建替周期を 60 年と設定した場合，年間建替面積が現状の大阪市の非住宅建築物の年間着工延床面積と同水準（標準値を 60 年）と設定
大幅改修		15 年	ザイマックス総研調査（オフィスビル外壁改修：平均15年）や国土交通省調査（マンション大規模修繕工事に係る実態調査：更新周期が概ね 10～20 年）などから設定
設備更新	空調	20 年	空調衛生工学会や日本建築学会論文，BELCA（建築物のライフサイクルマネジメントデータ集）などから設定（BELCA 記載の平均的な値：20 年）
	換気	20 年	
	照明	15 年	・照明学会報告書や BELCA などから設定（BELCA 記載の平均的な値：15 年） ・2030 年度までに蛍光灯の製造が終了するため，2035 年度までに全て LED に置き換わる設定
	給湯	15 年	日本建築学会論文（既存住宅の給湯器交換傾向）や BELCA などから設定（平均的な値：15 年）
	昇降機	30 年	BELCAなどから設定（BELCA記載の平均的な値：30 年）
	ｺﾝｾﾝﾄ他	10 年	一律 10 年と設定

2050年まで各種イベントに合わせて省エネ性能の向上や再エネ設備の導入が発生するとした際に考えらえる対策内容等を検討し，パラメータとして設定した．設定結果を**表-2**に示す．

例えば，各種設備更新時には高効率機器（トップランナー基準を超える設備）の導入による省エネ性能の向上が期待される．また，建築物の建替

や大幅改修時には壁面へのペロブスカイト太陽電池の導入などが考えられる．

2050年までの対策実施の有無，周期，導入率を変えることで，多様な組合せによる対策シミュレーションとCO2排出削減効果を検討できるよう工夫した．

表-2　設定した各種パラメータと変数

各種パラメータ		変数
1	建替	周期
2	大幅改修	周期
3	各種設備更新	周期
4	設備更新時の高効率機器	導入率
5	設備更新時の空調AI制御	導入有無、導入率
6	地中熱利用設備	導入率
7	屋根置き太陽光発電設備	導入率
8	ペロブスカイト太陽電池（壁面への導入を想定）	導入率
9	建物間熱融通	導入率
10	オフサイトPPA	導入有無

なお，ペロブスカイト太陽電池については，建築物の3Dモデルを用いた日射量シミュレーションを実施し，壁面の発電量ポテンシャル（kWh/年）を推計した（**図-2**）．発電量の推計は，**図-3**に示す式を用いて日射量から算出した．

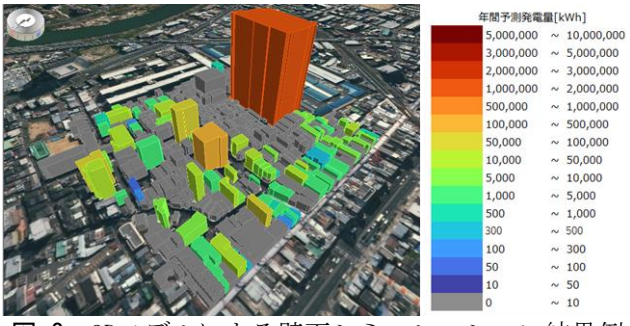

図-2　3Dモデルによる壁面シミュレーション結果例

年間予測発電量(kWh)
＝ 設置可能システム容量(kW)×年間予測日射量(kWh/㎡)×
基本設計係数×1/標準試験条件における日射強度(kW/㎡)

・設置可能システム容量(kW)
＝パネル面積(㎡)×単位面積当たり容量(kW/㎡)×設置係数
・年間予測日射量、パネル面積:3D都市モデルを用いたシミュレーション結果
・基本設計係数:0.88
・標準試験条件における日射強度:1
・単位面積当たり容量:0.150
・設置係数:0.85or0.5
計算式はJIS C 8907「太陽光発電システムの発電電力量推定方法」（2005年)を一部加工

図-3　発電量ポテンシャルの算出式

c）シナリオの設定

2050年までのCO2排出削減量について，大阪市の目標を達成するために特に有効な対策や，組合せ等を検討するために，現状すう勢（以下、BAU）シナリオと目標達成シナリオを設定した．

BAUシナリオでは，建築物の建替時のみ省エネ基準に沿って設備の高効率化が図られるものとし，建替を伴わないケースでの設備高効率化，再エネ導入は考慮しなかった．

目標達成シナリオでは，大阪市の業務部門における2030年CO2排出量61％減（2013年度比），2050年度カーボンニュートラル達成を見据え，高効率機器と再エネ設備の最大限導入を考慮した．

ここでは，目標達成シナリオにおける各種パラメータと変数の推移を**表-3**に示す．なお，建物の建替周期は竣工年後60年，改修周期は15年，設備更新周期は**表-1**に示す通りとした．

表-3　目標達成シナリオの各パラメータと導入率

パラメータ＼年次	2025	2030	2035	2040	2045	2050
高効率機器	60%	70%	80%	100%	100%	100%
空調 AI 制御	20%	50%	60%	70%	80%	90%
屋根設置型太陽光	100%	100%	100%	100%	100%	100%
ペロブスカイト	0%	30%	40%	50%	60%	70%
地中熱	10%	20%	30%	40%	45%	50%
建物間熱融通	建替時等に設置可能な箇所に導入					

d）CO2排出削減効果の評価

a)～c)で設定した内容から，2050年までのCO2排出削減量を推計し，各種パラメータの対策効果を確認した．目標達成シナリオにおけるCO2排出削減効果を**表-4**，**表-5**に示す．

大阪市内の省エネ・再エネ設備の導入等に関して最大限の努力により，CO2排出量の削減率（2013年度比）が2030年度で60%，2050年度で99%と推計された．CO2排出係数の将来的な低減を前提とし，大阪市の目標達成に向けては，空調等の設備更新や運用改善等の省エネ効果が大きいこと，再エネの最大限導入が不可欠なことが明らかとなった．

表-4　目標達成シナリオにおける2030年度のCO2排出削減効果

パラメータ	CO2 排出量 千 t-CO2/年	CO2 削減量 千 t-CO2/年	削減率 %
市内の対策効果合計	2,506	3,780	60.1
設備高効率機器	－	3,297	52.6
空調 AI 制御	－	162	2.5
屋根設置型太陽光	－	197	3.1
ペロブスカイト	－	33	0.5
地中熱	－	52	0.8
建物間熱融通	－	39	0.6
域外オフサイト PPA	－	54	0.9

表-5　目標達成シナリオにおける2050年度のCO2排出削減効果

パラメータ	CO2 排出量 千 t-CO2/年	CO2 削減量 千 t-CO2/年	削減率 %
市内の対策効果合計	66	6,220	99.0
設備高効率機器	－	5,730	91.2
空調 AI 制御	－	213	3.4
屋根設置型太陽光	－	98	1.6
ペロブスカイト	－	99	1.6
地中熱	－	66	1.0
建物間熱融通	－	15	0.2
域外オフサイト PPA	－	66	1.0

(2) 可視化の検討

オフィスビルにおけるCO2排出量の実態や，2050年までの省エネ・再エネ等の対策効果を可視化するため，CO2削減モデルの検討結果を反映したシミュレーションが実行可能なツール「CO2削減モデルシミュレーター」を開発した．画面及び各種機能を**図-4**に示す．

ツールの開発にあたっては，自治体職員によるテスト操作から意見を聴取し反映することで，ユーザーの操作性や視認性に配慮した画面設計を検討した．

ツールの操作方法としては，Step1で各種パラメータを設定し，Step2でCO2排出削減量の推計結果の出力先を選択し解析を実行，Step3で表示させたい推計結果（年次や推計項目）を選択し，ツール内で簡易的に確認することができるようにした．

また，Step4では，解析表示された地図情報を保存する機能を設け，解析結果を今後の各種検討における材料として使用可能にするなど工夫した．

なお，ツール画面上はパラメータ設定を高・中・低から選択とし，それぞれの導入率等の値は別途設定ファイルから読み込む形とした．設定ファイルを編集することで，ユーザー側で導入率等の値を自由に設定できるようにした．

(3) 脱炭素に向けた行動変容を促すための情報発信

民間事業者等の自発的な取組促進や，市民一人ひとりの消費行動の転換を図っていくために，本検討における各種調査結果やCO2排出削減量等の推計結果について2D・3D地図等を活用し，よりわかりやすい形で大阪市のホームページ及び国土交通省のPLATEAU VIEW 4.0（https://plateauview.mlit.go.jp/）へ公表した．公表イメージを**図-5**に示す．

4．まとめと今後の展望

本検討では，オフィスビルのCO2排出量削減目標の達成に向けて，CO2削減モデルの構築と可視化による省エネ・再エネ対策効果の評価を行った．

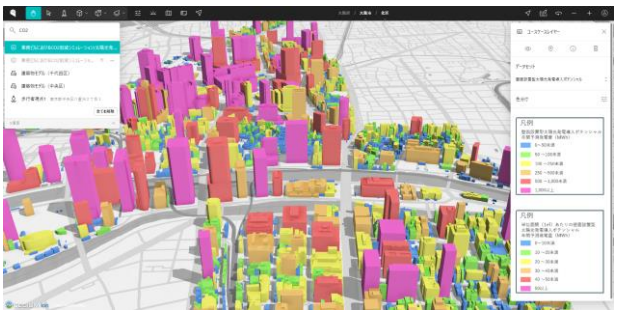

図-5　3D地図による情報発信イメージ

目標達成シナリオでは，CO2排出削減率（2013年度比）が2030年度で60%，2050年度で99%と推計され，目標達成に向けては空調等の設備更新や運用改善等の省エネ効果が重要であり，再エネの最大限導入が不可欠なことが明らかになった．これより，オフィスビルのCO2排出量の実態と，将来的な削減に関する省エネ・再エネ対策の効果を把握するツールとしての有効性が確認された．

今後は，本ツールを活用した行政による施策立案，ビルオーナーの行動変容を促すための更なる情報発信の取組支援等が望まれる．さらに，今回対象としたオフィスビル以外に，住宅等へも対象を広げて推計できるよう改良していくことで，全国への展開も期待される．

謝辞：本検討は，大阪市環境局環境施策部からの業務委託により令和6年度に実施した．本稿の執筆にあたり，大阪市環境局環境施策部並びにアンケートやヒアリング調査へご協力いただいたオフィスビルオーナーの皆様へ厚く御礼申し上げます．

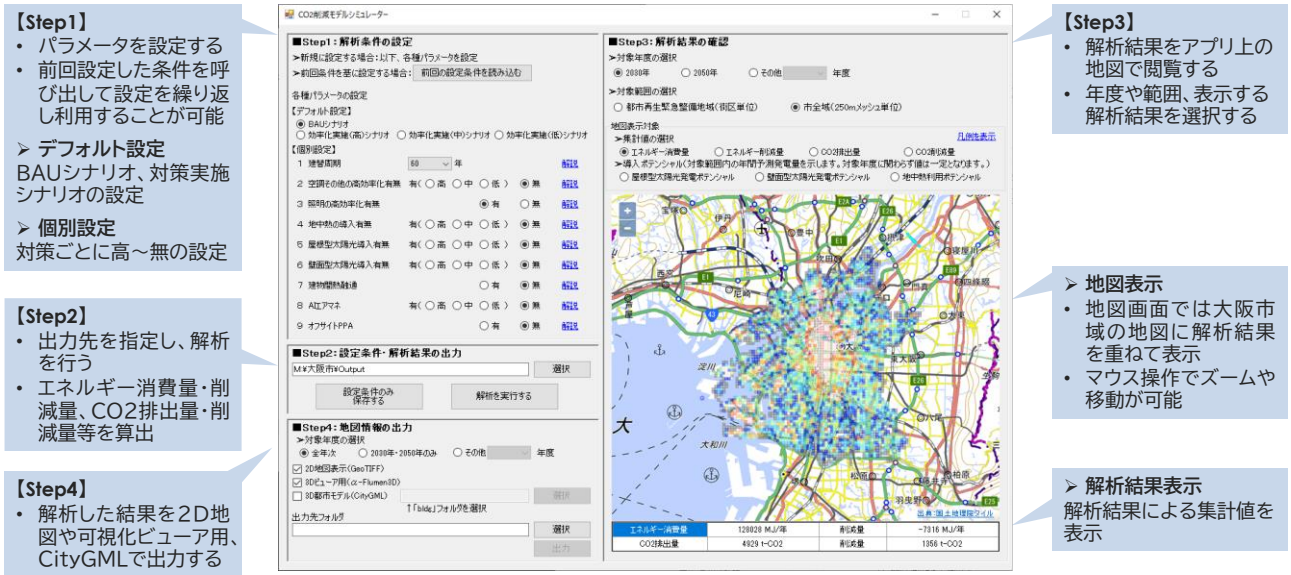

図-4　CO2削減モデルシミュレーターの画面及び各種機能