

特集 サステナブルなまちづくりに向けた気候変動対応, カーボンニュートラルの取り組み

Responding to Climate Change and Carbon Neutrality Initiatives for Creation of Sustainable Towns

Summary

Chapter1: Global warming is an urgent issue that must be stopped immediately in order to realize a sustainable society. In this special issue, we discuss the current state of global warming and the need for the construction industry to take action to address the issue, and introduce our company's efforts to address climate change and become carbon neutral.

Chapter2: In recent years, Japan has experienced what will be called unexpected weather disasters every year. Climate change is expected to make such disasters even more devastating, and we have been engaged in research and development of climate change mitigation/adaptation measures. Kazamidori, a numerical wind tunnel, is a wind-resistant computational analysis tool that can even take future super typhoons into account, and was developed to solve various urban wind-related problems. Kazamidori and other advanced technologies are being developed in collaboration with universities, companies in different fields, and other external parties.

Chapter3: By utilizing low-carbon concrete, it is possible to reduce CO₂ emissions significantly during building construction. First, we will introduce the technical overview and application results of low-carbon concrete (Energy · CO₂ Minimum (ECM) concrete) containing a large amount of ground granulated blast furnace slag. In addition, an overview of carbon-negative concrete, which is currently under research and development in the Green Innovation Fund project, will be introduced.

Chapter4: We are working to decarbonize the buildings we provide to our clients across their entire life cycle (material production, construction, operation, and demolition), of which operational CO₂ emissions account for the largest proportion. In response, we are working to expand ZEB (Net Zero Energy Building) through effective design that incorporates natural ventilation and natural lighting, and thorough energy-saving design and utilization of renewable energy through the adoption and development of various technologies. In addition, we have developed and commercialized a technology to recover food waste as biogas after methane fermentation in the building, and is promoting its deployment as an energy-creating technology that promotes resource recycling.

Chapter5: The "Creation of Sustainable Towns" social cooperation research program was established at the Graduate School of Engineering, the University of Tokyo. In this project, three research areas will be set up, and research will be conducted on the spatial configuration of buildings and towns, evaluation methods, and enlightenment of concepts for decarbonization and revitalization of resource recycling. This chapter reports on the outline of the inaugural symposium held to celebrate the establishment of this social collaboration course.

This paper presents the current situation of global warming and the need for measures in the construction industry, and outlines our efforts to cope with climate change and achieve carbon neutrality, as well as our new joint research efforts to realize a sustainable city, with examples of specific technical studies.

At this point, the roadmap to carbon neutrality has not been finalized, and there is a mountain of technical and social system issues to be addressed. In the future, we would like to further develop the technologies introduced in this paper and promote their early implementation in society, as well as study and implement rational solutions to various social issues in addition to the realization of carbon neutrality, with the aim of realizing a sustainable city.

Keywords: global warming, carbon neutrality, climate change, meteorological disaster, numerical wind tunnel, wind resistant design, energy · CO₂ minimum (ECM) concrete, carbon-negative concrete, ZEB, energy-creating technology that promotes resource recycling, sustainable towns, social cooperation research program

1 はじめに

Introduction

奥田 信康 Nobuyasu Okuda*1

地球温暖化の進行は、気温の上昇や干ばつや水害などの異常気象の多発を誘引し、水・食料不足・健康被害など人間生活にも悪影響を与え、世界各地で経済的格差の加速にもつながることから、持続可能な社会を実現する上で直ちに食い止める必要のある喫緊の課題である。本特集では、地球温暖化の現状と建設業としての対策の必要性を述べ、気候変動対応及びカーボンニュートラル実現に向けた当社の取り組み状況について紹介する。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第6次報告書¹⁾では、気候変動の現状として『人間の影響が大気・海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない。大気、海洋、雪氷圏及び生物圏において、広範囲かつ急速な変化が表れている。』と評価され、将来ありうる気候として『少なくとも今世紀半ばまでの世界平均気温の上昇が継続し、21世紀中に地球温暖化は1.5℃及び2℃を超える。』と報告されている。地球温暖化が進行すると、熱波や干ばつの同時発生、火災の発生しやすい高温、乾燥、強風等の極端な気象現象の頻発を招き、極端な降雨や河川氾濫と高潮の組み合わせによる洪水をはじめとした「複合的な極端現象」の発生確率が高まることが懸念される。現在の化石燃料依存型社会の継続は気候危機到来を加速させてしまうため、21世紀半ばには実質CO₂排出ゼロを実現することが望ましいと主張されている。

日本では、パリ協定に定める目標等を踏まえ、2020年10月に「2050年カーボンニュートラルの実現」が宣言され、また、2030年度に温室効果ガス排出量を2013年度比で46%削減を目指し、様々な取り組みが一気に開始された²⁾。「地球温暖化対策は経済成長の制約ではなく、経済社会を大きく変革し、投資を促し、生産性を向上させ、産業構造の大転換と力強い成長を生み出すその鍵となるもの」という政府の基本的な考え方のもと、エネルギー、産業、運輸、地域・くらし、吸収源対策など重点分野を中心に公的資金が投入され、脱炭素社会の早期実現に向けた検討が進んでいる。また、ESG金融の進展とも相まって、グローバル企業を始めとして「脱炭素」を企業経営に取り組み動きが国際的に拡大している。脱炭素経営の取り組みは、自社の企業価値向上のみならず、他社との差別化やビジネスチャンス獲得にもつながることから、気候変動に対応した経営戦略の開示(TCFD)や脱炭素に向けた目標設定(SBT, RE100)へ参加する企業が増加している。

日本における2020年度の温室効果ガスの排出量は、CO₂換算で年間11.5億トンであり、エネルギー起源のCO₂排出量を分野別にみると、産業部門36.5%、運輸部門19.1%、業務その他部門19.1%、家庭部門17.3%、エネルギー転換部門8.0%であった。建設業では、工事や事業活動で直接使用する電気・燃料等のCO₂排出量は、全体の約0.6%と占める割合は低いが、建設資材の製造・運搬及び建物運用時（空調・照明・給湯など）におけるCO₂排出量は業務その他部門・家庭部門に該当し、CO₂排出量全体の約1/3を占めている。以上より、2050年カーボンニュートラルの実現に向け、住宅や建築物におけるCO₂排出量削減の対策は重要であり、建設業界が担うべき役割や期待も大きいといえる³⁾。

竹中工務店では、2010年にエネルギー削減目標を設定し、これまでネット・ゼロエネルギー・ビル（ZEB）の実現に向けた取り組みを進め、2021年3月には2050年カーボンニュートラル実現に向け、事業活動全体を包含したCO₂削減の長期目標を設定した⁴⁾。技術研究所では、これら当社長期目標を受け、従来の省エネルギーや資源循環などの開発分野に、脱炭素推進及び気候変動適応のための技術分野を加え、社内関係者及び社外の産官学との協力体制を構築し、カーボンニュートラル実現に貢献する技術開発を加速させている。以下に、主な検討内容について示す。

I. 気候変動適応策の検討

上述のように、地球温暖化の進行により、スーパー台風や集中豪雨による都市水害の規模拡大が懸念される。当社では、主に都市における風・水害等について建物やまちへの影響を予測し、被害発生を未然に防ぐための対策や設計基準の見直しを行う技術開発を進めている。本特集の2章「気候変動への取り組み」にて、建物やまちへの風の影響を高度解析する「数値風洞kazamidori」の活用状況を紹介する。

*1 技術研究所 環境・社会研究部長 博士(工学) General Manager, Environmental & Social Research Department, Research & Development Institute, Dr. Eng.

II. 自社のCO₂排出量削減（オフィス活動・建設活動）（Scope1+2）

自社のエネルギー使用に起因するCO₂排出量は、自社努力により確実に削減する必要がある。そのため、各本支店が主体となって、オフィス・作業所における省エネ活動や低炭素な施工技術の開発・採用に加え、作業所の仮設電源への再生可能エネルギーの導入検討などが進められている。

III. 建物のライフサイクルにおけるCO₂排出量削減（Scope3）

当社では、お客様に提供する建物のライフサイクル（資材の製造・建設・運用・解体）の全てにわたる脱炭素化に取り組んでいる。

(1) 資材の製造・建設時

建物建設時のCO₂排出量は、建物ライフサイクル全体発生量の3割強であり、構造体となる鉄及びコンクリートの割合が大きい。当社では、CO₂を長期間固定する木材の利用や製造時のCO₂排出量が少ない資材のグリーン調達を推進すると共に、低炭素型のセメント・コンクリートの開発と適用拡大を進めている。本特集の3章「カーボンニュートラル実現の取り組み（建物をつくる）」にて、共同開発した低炭素型の「ECMセメント・コンクリート」の活用状況とグリーンイノベーション基金事業で開発中のカーボンネガティブコンクリートについて紹介する。

(2) 建物運用時

建物の運用は30年以上の長期間となることから、建物運用時のCO₂排出量は建物ライフサイクル全体発生量の6割強にも相当する。建物の環境性能は、設計段階での計画・仕様・機器選定などで決定される。当社では、設計部が主導して、環境性能の高い建築設計を提案しており、自然通風や自然採光を取り込んだ設計や、様々な技術の採用・開発などによる徹底的な省エネルギー設計と再生可能エネルギー活用により、ZEB（ネット・ゼロエネルギー・ビル）の拡大を推進している。また、生ごみを建物内でメタン発酵させてバイオガスとして回収する技術を開発・実用化し、資源循環を促進する創エネルギー技術「メタファーム」の展開を進めている。本特集の4章「カーボンニュートラル実現の取り組み（建物を運用する）」では、ZEBの取り組みと創エネルギー技術「メタファーム」の事例について紹介する。

(3) 解体廃棄時

これまでは数十年先の解体を考慮した設計はほとんどなされていないと思われる。今後は、設計段階から、解体時の環境負荷を減らすための配慮を行う。

IV. サステナブルなまちの創生の検討

2022年4月1日より竹中工務店と東京大学が連携し、東京大学大学院工学系研究科に「サステナブルなまちの創生」社会連携講座が設立された。カーボンニュートラル実現の取り組みの対象を建物からまちに拡大し、都市部における脱炭素・資源循環の活性化のために、建物・まちの空間構成の計画具現化、現状の建物、建物群、街区の脱炭素・資源循環を評価する手法の確立を目指した研究を行い、評価モデルの有効性を実証するために自治体、地域コミュニティ、地場企業との協創関係の構築を進め、「サステナブルなまち」コンセプトの啓蒙と普及を図ることを目指すものである。本特集の5章「サステナブルなまちの創生に向けて」では、この社会連携講座の概要について紹介する。

2 気候変動への取り組み Initiatives for Climate Change

畔上 泰彦 Yasuhiko Azegami*2 田中 英之 Hideyuki Tanaka*3

2.1 気候変動がまちに与える影響 Impacts of Climate Change on Cities

温室効果ガスの排出によって引き起こされる気候変動は、気温、降水、風など様々な気象要素に変化をもたらす。日本においてもそうした変化が発生することが予測されており、RCP8.5シナリオ下では気温が約4.5℃の上昇、50mm/h以上の激しい雨の頻度が約2.3倍に増加、強い台風の割合が増加する可能性があることが述べられている⁵⁾。こうした変化は生態系、水環境、農業、水産業など様々な分野に影響を及ぼす可能性が示唆されているが、建物やまち、そこに住まう生活者への影響も大きいと考えられ、気温上昇による熱中症者数の増加⁶⁾、激しい雨による河川の越水氾濫可能性の上昇⁷⁾、台風による建築物の外装材の破損リスクの増加⁸⁾などが指摘されている。

2.2 気候変動における竹中工務店の取り組み Takenaka Corporation's Efforts in Climate Change

建築、まちづくり分野にも多くの影響を与える気候変動に対して、当社は建物やまちに関わる多くのステークホルダーと協調を図りながら、様々な取り組みを進めてきた。気候変動への対策は大きく以下の2つに分類される。①温室効果ガスの排出を抑制する気候変動緩和策、②気候変動による様々な悪影響に備える適応策である。どちらか一方の対策を進めれば良いということではなく、車の両輪のように両者に取り組むことが重要であると考えられ、当社もそれぞれの対策に関して先進的な研究開発を進めてきた。以下でその一部を紹介する。

緩和策に関する取り組みとしては、コンクリート材料の製造に係るCO₂排出量を60%以上(ポルトランドセメント比)削減できるECMコンクリートの開発や、耐火性能を持たせた集成木材「燃エンウッド」(Photo 1)をはじめ、他の建設資材に比べて多くの炭素を貯蔵できる木材を利用する技術開発などを進めている。また、生ごみ等から燃料となるバイオガスを生成する「メタファーム」の開発や、奥飛騨温泉郷にて、奥飛騨宝温泉協同組合と協働し、地熱発電事業を開始するなど、創エネ分野にも力を入れている。一方、適応策に関する取り組みとしては、水害リスク低減とQOL向上を両立するグリーンインフラの新技术「レインスケープ」(Photo 2)や将来のスーパー台風をも想定でき、街区内の「時々刻々と変化する風」を高精度に予測する数値シミュレーション技術である数値風洞「Kazamidori」の開発などを進めている。近年、毎年のように日本各地で大きな気象災害が発生し多くの被害が発生する中、当社では適応策に関する研究開発を加速させており、次節では数値風洞「Kazamidori」について詳しく紹介する。

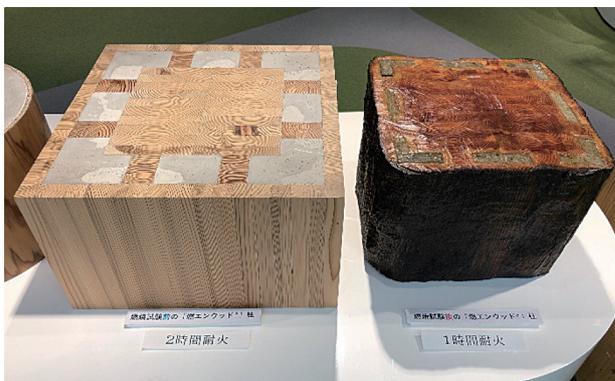


Photo 1 燃エンウッド
左図：燃焼実験前 右図：燃焼実験後
Moen-Wood
Left : Before combustion Right : After combustion



Photo 2 レインスケープが導入されている当社実験フィールド調の森 SHI-RA-BEの様子
Takenaka Corporation's experimental field SHI-RA-BE where rainscape is installed

*2 技術研究所 研究主任 Senior Researcher, Research & Development Institute

*3 技術研究所 環境・社会研究部 都市気候グループ長 博士(工学) Group Leader, Research & Development Institute, Dr. Eng.

2.3 数値風洞「Kazamidori」 Numerical Wind Tunnel “Kazamidori”

数値風洞「Kazamidori」は建物の耐風設計を主目的に開発された数値流体計算ツールである。デジタル空間上に市街地を再現した上で、時々刻々と変化する風の流れを計算し、建物に作用する風の力や建物周りの風速を予測することができる (Fig. 1)。耐風設計における風の予測には、風洞実験が用いられてきた。しかし、模型製作に多くの費用と期間がかかることや、小さな部材レベルまたは広範囲の市街地スケールに作用する風の評価が難しいことが課題となっていた。Kazamidoriは建物や周辺市街地をデジタル空間上にモデル化するため、細かな部材や広範囲の市街地を容易に再現できることに加え、期間やコスト面でも大きなメリットがある。そのため、風洞実験では現実的に難しかった設計初期段階での複数の建物形状の検討も可能である。Fig. 2は実際の建設プロジェクトにおける建物の断面形状の検討例を示している。この図を見ると、断面形状を変化させることで居住性評価に大きくかわる最大加速度 (水平) が約26%下がったことが分かる。高精度な居住性評価により、Active Mass Damper (AMD) などの制振装置の要/不要の判断が設計初期段階で可能となる他、建築主との振動許容値の合意形成についてもより早い段階で行えるようになるなど、多くのメリットが本技術によってもたらされている。

また、気象モデルで計算された風速の時刻歴データに対して、独自の手法で任意の風速変動を付加することで、様々な気象条件下における部材、建物に作用する風の正圧/負圧のピーク値や市街地の瞬間的な強風も見える化することができるのもKazamidoriの大きな特徴である。以下、東京都のある街区を対象に2019年台風19号の再現実験と将来気候下での実験 (将来実験) を行い、台風上陸時に街区内の風速や建物壁面に作用する風の力を計算した結果を紹介する。なお、気象モデルはWeather Research and Forecasting model (WRF) を使用し、将来実験は擬似温暖化手法⁹⁾を用いてRCP8.5シナリオ下でのCMIP5のGCMの30メンバーアンサンブル平均値を用い、2090年代 (2080-2099年) を対象に計算を行った。まず、気象モデルの再現実験の結果を初期値・境界値としてKazamidoriを用いた計算結果と観測値を比較すると、街区内のビル屋上での平均風速は観測値と計算値がそれぞれ4.2m/s、4.3m/sと良く一致していることが分かる (Fig. 3)。

また、瞬間的なピーク値も高い精度で再現できることも確認できる。建物壁面の風荷重のピーク値 (Fig. 4) を見ると、多くの建物壁面では、 $-2,000\text{N/m}^2 \sim 2,000\text{N/m}^2$ の値を示しているが、高層建物の屋上等では $-2,000\text{N/m}^2$ 以下のやや大きな負の値を示す部分も存在している。次に、将来実験の結果を確認する。台風が本州に接近した際の気圧配置図 (Fig. 5) を見ると、再現実験では台風を中心気圧が約960hPaなのに対し、将来実験では、約930hPaと30hPaほど気圧が低い結果となっており、将来気候下では台風が現在よりも強い勢力のまま上陸することが分かる。気象モデルの将来実験の結果を初期値・境界値として

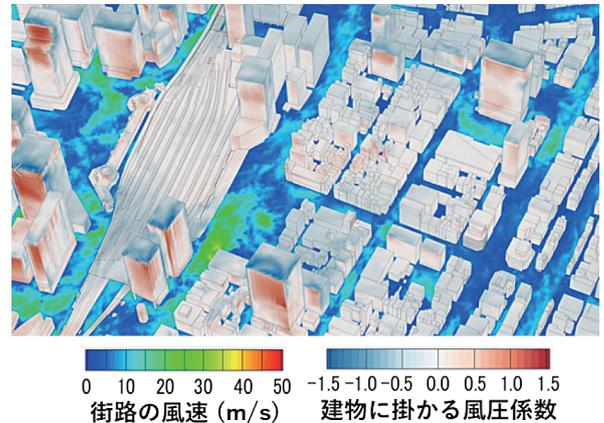


Fig. 1 街区を対象とした風速と風圧係数の計算例
Example of wind speed and wind pressure coefficient calculation for a city block

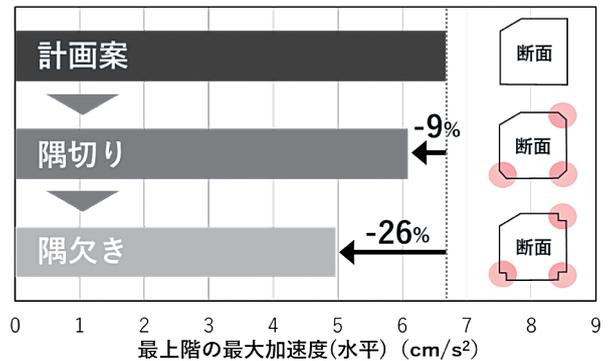


Fig. 2 建物形状による居住性能評価改善例
Example of improved occupancy performance evaluation based on building geometry

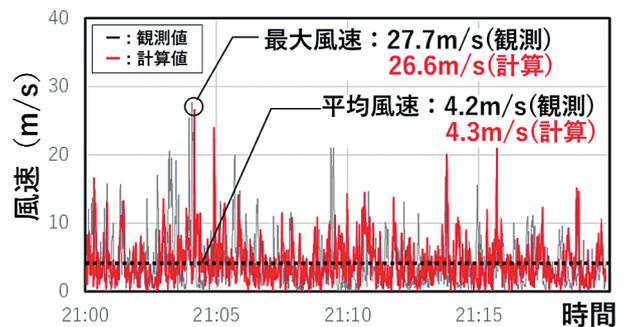


Fig. 3 2019年台風19号上陸時のビル屋上 (地上30m) での風速の比較
Comparison of wind speeds on the roof of a building (30 m above ground level) during landfall of Typhoon Hagibis in 2019

Kazamidoriを用いて計算した建物壁面の風荷重のピーク値 (Fig. 4) を見ると、正側では多くの建物壁面で、1,500～3,000N/m²の値を示している。一方、負側では高層建物の屋上や隅角部を中心に、-4,000N/m²以下の非常に大きな値を示している部分も多くあり、将来気候下では現在気候下よりも建物に大きな荷重が作用する可能性が高いと考えられる。

現在、毎年のように国内のどこかで想定外と言われるような気象災害が発生し、想定外を想定内として捉えることが求められている。過去の台風の再現だけでなく、今後増加が懸念されるスーパー台風の風をもリアルに予測できる技術を、ある建物、ある街区に留まることなく広く活用し、社内外の多くのステークホルダーとも連携しながら災害に強いまちづくりに貢献していきたい。

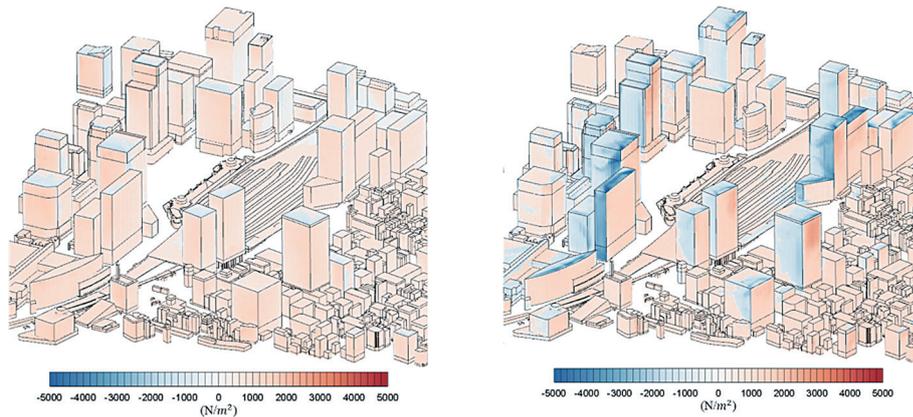


Fig. 4 街区内の建物壁面の風荷重のピーク値 左図：再現実験 右図：将来実験
 Peak wind load values for building walls in the city block
 Left : Current Climate Experiments Right : Future Climate Experiment

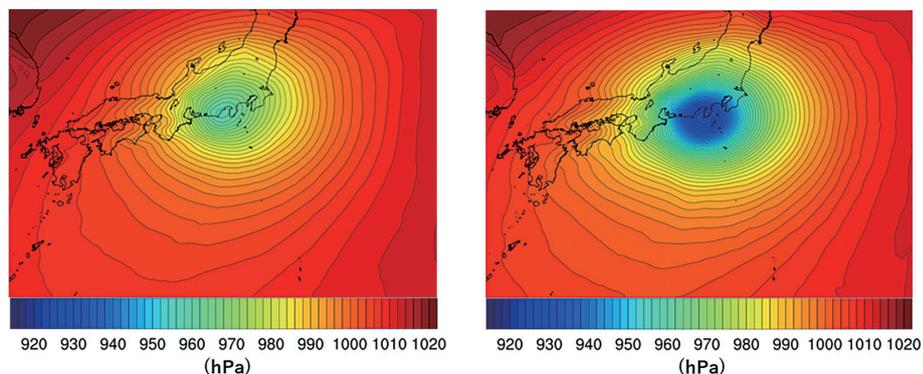


Fig. 5 2019年台風19号日本上陸時の気圧配置 左図：再現実験 右図：将来実験
 Pressure pattern at landfall of Typhoon Hagibis in Japan in 2019
 Left : Current Climate Experiments Right : Future Climate Experiment

2.4 社外連携の取り組み External Cooperation Initiatives

Kazamidoriの開発をはじめとして気候変動適応策に関する研究開発を深化・加速させるため、社外との連携も積極的に取り組んでいる。例えば、筑波大学日下研究室とは2017年からデータ同化や将来気候下での数値シミュレーションに関する共同研究を進めており、日下教授から気象分野視点での大変有益なご助言をいただいている。また、研究室の学生を当社技術研究所にお呼びしての研究ディスカッションなども行っており (Photo 3)、連携を深めている。大学だけでなく、民間気象情報会社である株式会社ウェザーニューズとも連携を進めており、2021年には気候変動対策に関する協定書を締結した。この協定書は気候変動が建物やまちに与える影響の検討や気候変動リスクの抽出と対策などに連携しながら取り組んでいくことを示したものである。ウェザーニューズ社とは将来の風速や雨量の設計基準値に関する研究開発に取り組んでおり、大規模なアンサンブル実験データである地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース^{10),11)} (database for Policy Decision making for Future climate change,

d4PDF)の要素抽出や気候変動データに関する様々な情報提供などをいただいている (Photo 4)。また、研究開発だけでなく、作業所やエンジニアリング部門といった様々な部署との連携も進んでおり、連携の規模も拡大している。ウェザーニューズ社には当社を社会課題解決における良いパートナーとして認識いただいております。「パリ協定で合意された1.5℃目標の達成と共に、気候変動への適応の両面から竹中工務店様とは、気候変動による気象パターンの変化に応じた建築物の設計や、自然資本を活用した持続可能な都市開発などを進めていきたいと考えております。また、その都市に暮らす人たちの安全安心な生活ができるような取組みも合わせて進めていきます。(株式会社ウェザーニューズ Climate Tech事業部 鈴木 孝宗グループリーダー)」といったコメントをいただいている。今後も社外との連携を深めながら気候変動に関する多くの複雑な課題を分野横断で解決していきたい。



Photo 3 日下研究室との研究ディスカッションの様子
Research discussion with Kusaka Lab.



Photo 4 ウェザーニューズ社との研究ディスカッションの様子
Research discussion with Weathernews, Inc.

3 カーボンニュートラル実現の取り組み（建物をつくる） Efforts to Achieve Carbon Neutrality（Build a Building）

小島 正朗 Masaro Kojima*4 辻 大二郎 Daijiro Tsuji*5

3.1 建物建設時のCO₂排出量の現状と課題

Current Status and Issues of CO₂ Emissions during Building Construction

建物建設時のCO₂排出量のほぼ8割以上は、建築物の主要な躯体材料である鉄及びコンクリートの材料由来のCO₂排出量である。そのうち、コンクリートの構成材料では、特にセメント関連のCO₂排出量が大きく、日本全体のCO₂排出量の3~4%を占める。これは、高温焼成と原料の石灰石からの脱炭酸により、セメント製造時のCO₂排出量原単位が768kg/tと極めて大きいことに起因しており、セメント関連でのCO₂排出量を削減することが喫緊の課題である。このような状況の中、セメントを低炭素材料に代替する技術への期待が大きい。

本稿では、コンクリートに関わるCO₂削減を目的に開発したECM（エネルギー・CO₂・ミニマム）コンクリートの技術概要とその適用事例、さらには、2021年度からNEDOグリーンイノベーション基金で研究開発に着手したカーボンネガティブコンクリートの技術概要について述べる。

3.2 ECMコンクリートの紹介・適用実績

Introduction and Application Results of ECM Concrete

ECM（エネルギー・CO₂ミニマム）セメントは、2008年から国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）助成による「ECMセメント・コンクリートシステム」の研究開発において開発された低炭素型セメントであり、CO₂削減と品質の両立をコンセプトに高炉スラグ微粉末を60~70%と高含有した高炉スラグ高含有セメントである。

ECMセメントとECMセメントを用いた構造体の例をFig. 6に示す。またECMコンクリートに用いる結合材の材料構成をFig. 7に示す。ECMコンクリートは、普通ポルトランドセメントに対してCO₂排出量原単位が約1/30程度と小さい鉄鋼製造時の副産物である高炉スラグ微粉末を60~70%使用することでコンクリートのCO₂排出量を6~7割削減することが可能である。

ECMセメントでは、材齢初期の強度発現が小さいといった課題に対し、強度の改善を図るため、新たにセメントの組成の改良を行っている。ECMセメントでは、凝結特性と硬化体の耐久性の観点から普通ポルトランドセメントの混合率を30~35%と定め、強度と水和熱の観点から高炉スラグ微粉末の粉末度を4,000~4,500cm²/gとし、高炉スラグ微粉末の混合率で65%程度を最適なセメントの組成として選定している。また、結合材中にカルシウム系添加材を添加することで収縮を小さくし、収縮ひび割れ抵抗性を向上させている。また、高炉スラグを高含有することで低発熱によるマスコンクリートの温度ひび割れ抑制、酸・塩化物イオン侵入抵抗性などの耐久性向上が期待できるため、主に地下構造物の適用に適した特性を有している。

ECMコンクリートは、日本建築総合試験所（GBRC）で建設材料技術性能証明書（GBRC 材料証明 第13-11号改2：高

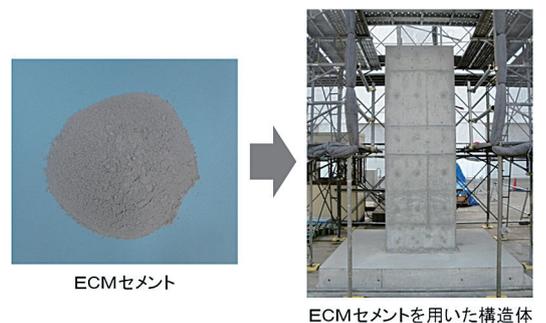


Fig. 6 ECMセメントとECMセメントを用いた構造体の例
Examples of structures using ECM cement and ECM cement

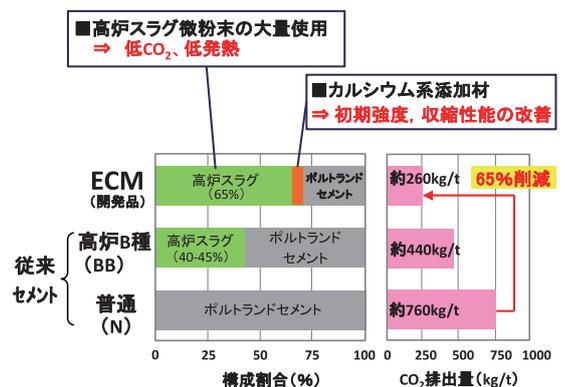


Fig. 7 ECMセメントの構成とCO₂排出量
ECM cement composition and CO₂ emissions

*4 技術研究所 主席研究員 博士(工学) Senior Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

*5 技術研究所 建設基盤技術研究部 建設材料グループ長 博士(工学) Group Leader, Research & Development Institute, Dr. Eng.

炉スラグ微粉末を高含有する低発熱・低環境負荷コンクリート工法(改定2)を取得しており、JIS A 5308(レディミクストコンクリート)の品質規定を満足しているため、通常の普通コンクリートとして適用できる。

ECMコンクリートの適用状況をPhoto 5に示す。高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの施工上の課題であった経時の流動性低下を改善した化学混和剤を用いており、通常の普通コンクリートと同等のフレッシュ性状と施工性を有している。

当社のECMコンクリートの適用数量の推移をFig. 8に示す。2014年にECMコンクリートを超高層建築物の杭に適用したのを皮切りに、地下躯体を中心に建物に適用し、2021年12月末には、弊社のECMコンクリートの適用件数は約56件、適用量は約15万 m^3 に達している。CO₂削減量は総計約2.7万トン-CO₂となる。現時点でECMコンクリートの適用を計画しているプロジェクトが多数あることに加え、最近、発注者からの脱炭素に貢献できる技術として引き合いが増えてきている。現在の年間2~3万 m^3 程度の適用量であるが、積極的にプロジェクトに適用していく予定で、さらなる需要増加が見込まれる。



Photo 5 ECMコンクリートの適用状況
Application status of ECM concrete

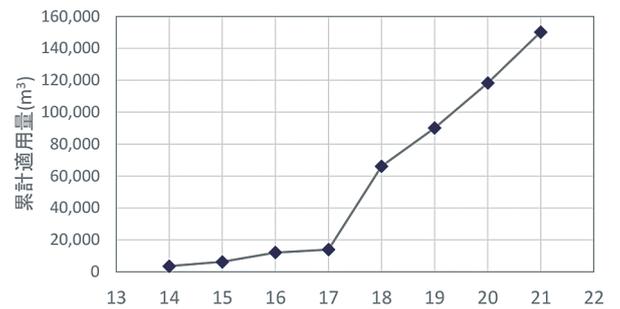


Fig. 8 ECMコンクリートの適用数量の推移
Trends in applied volume of ECM concrete

3.3 カーボンネガティブコンクリートの研究開発 Research and Development of Carbon Negative Concrete

建設時のCO₂排出量の削減には、既開発のECMコンクリートの適用拡大が極めて有効であり、今後、さらに普及を推し進めていくことが重要である。しかし、さらに長期的な視点にたつて2050年カーボンニュートラルを実現することを考えると、コンクリートのCO₂排出量を削減するだけでは不十分であり、将来に向けてはコンクリートの製造に関わるCO₂の排出量よりも固定量の方が多量なカーボンネガティブコンクリートが必要になってくる。当社では、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下「NEDO」という。)のグリーンイノベーション基金事業(以下「GI」という。)[「CO₂を用いたコンクリート等製造技術開発プロジェクト」]¹²⁾で示された国の研究開発・社会実装計画¹³⁾に沿って、2021年~2030年の10年間にわたる支援を受け、「革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術及び品質評価技術の開発」(以下、本プロジェクト)に取り組んでいる。

Fig. 9は、コンクリートのカーボンネガティブ化の方向性である。カーボンネガティブ化を実現するためには、1. コンクリート製造時のCO₂を減らす技術、2. CO₂を吸わせた材料(以下、CCU材料。CCUはCarbon Capture and Utilizationの略)の製造技術とコンクリートへの利用技術、3. コンクリート構造物にCO₂を吸わせる技術の3つの技術を、それぞれ高度化したうえで、組み合わせることが必要となる。

3つの技術の概要をFig. 10に示す。1. はECMコンクリートのようにコンクリート製造時のCO₂発生量の低減技術であり、これがカーボンネガティブコンクリートのベースとなる。躯体材料には、堅固で長期的に安定していることに加え、大量供給できることが求められるため、現状の国内の隅々まで整備されたセメント・コンクリートの供給システムを活用することが前提と考えられる。2. のCCU材料の活用は、コンクリート廃材に含まれるカルシウム分にCO₂を吸収させて炭酸カルシウムとして固

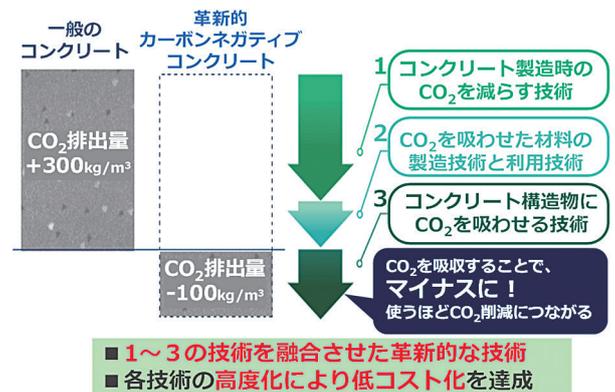


Fig. 9 コンクリートのカーボンネガティブ化の方向性
Direction of Carbon-Negative Concrete

化させてコンクリート用のCCU材料を製造する技術と、製造したCCU材料のコンクリートへの利用技術により実現する。コンクリート廃材に含まれるセメント起源のカルシウムは、コンクリートの主要原料であるセメントを製造する際に炭酸カルシウムから脱炭酸されたものであり、CO₂を作用させることで再び炭酸カルシウムに戻すことができる。CO₂を固定した炭酸カルシウムを含むCCU材料（CO₂固定微粉、CO₂固定再生骨材）をコンクリートに使用することで、CO₂をマイナスカウントすることができる。3.のCO₂吸収型コンクリートは、CO₂吸収型混和材を利用してコンクリートに積極的にCO₂を吸収させ、CO₂を固定化する過程でコンクリートを硬化させるものである。従来からCO₂によるコンクリートの中性化は、鉄筋の防錆効果が喪失されることから、中性化=寿命とされてきたが、実際にはコンクリートが中性化しても、水分が供給されない限り鉄筋は腐食しない。このことを踏まえ日本建築学会では、コンクリートの中性化と寿命に関する議論¹⁴⁾をしてきており、2022年11月に改定された日本建築学会標準仕様書JASS 5では、水分の供給がない部位・部材（例えば、屋内で雨がかりや結露が無い部位）は、一般劣化環境（非腐食環境）として、中性化を考慮しなくてよいことになった。既に土木学会では、中性化に対する照査に替えて、水分浸入に対する耐久性の照査が行われている。このような背景のなか、CO₂吸収型コンクリートの開発を進めていくことになるが、そのまま適用可能な部位・部材の見極めや、水分供給を遮断する表面被覆工法、耐食性鉄筋との組み合わせなど、本プロジェクトで検証していく予定である。



Fig. 10 カーボンネガティブコンクリートを構成する技術の概要
Outline of technology for constructing carbon-negative concrete

3.4 実現のための社外連携体制（GIコンソーシアムの紹介）

Carbon Negative Concrete External Collaboration System for Realization (Introduction of GI Consortium)

コンクリートのカーボンネガティブ化のための技術を構築して社会実装していくためには、個社の取り組みでは実行性は低い。本プロジェクトでは、当社、鹿島建設、デンカの3社を幹事会社とする55事業者によるコンソーシアムを立ち上げ取り組んでいる¹⁵⁾。コンソーシアムは、ゼネコン、CCU材料関連メーカー、セメント・混和材メーカー、生コン工場、混和剤メーカー、プラントメーカー、プレキャスト製造メーカー、商社、計測・システムメーカー、大学研究機関の民間企業44社、10大学、1研究機関と幅広い。コンクリートに関するサプライチェーンのみならず、その周辺分野も含めて幅広い業種からの参画を得て、技術開発と社会実装のスピードアップを図っていく予定である。

4 カーボンニュートラル実現の取り組み（建物を運用する） Efforts to Achieve Carbon Neutrality (Operate a Building)

和田 一樹 Kazuki Wada*6 川尻 聡 Satoshi Kawajiri*7

4.1 建物運用におけるCO₂排出量の現状・課題

Current Status and Issues of CO₂ Emitted During Building Operation

一般的に建築物のライフサイクルCO₂を考えた場合、建物運用時に排出されるCO₂の割合が最も多い。Fig. 11に当社スコープ3のCO₂排出量削減の目標値を示す。自社オフィスや建設現場で使用する燃料や電力といった自社で直接排出するスコープ1、2のみならず、調達してくる資材や設計建物の運用時などに間接的に排出するスコープ3を含めて2050年に排出ゼロを目指し、2030年の中間目標を設定している。排出するCO₂の割合としては、スコープ3の方が圧倒的に多く、設計した建物の運用時CO₂排出量が現在6割を占めている状況であることから、設計した建物の運用時に使われるエネルギー消費量を最小化していくことが重要であることを示している。2021年8月に国土交通省の検討会で示された「脱炭素社会に向けた建築物の省エネ対策などのあり方・進め方¹⁶⁾」においても、建物運用時のエネルギー消費に関わる省エネ基準や誘導基準などを段階的かつ短期的に強化する方針が示され、同年10月に閣議決定された第6次エネルギー基本計画に盛り込まれた。大規模な建物から順次基準が引き上げられていく方針で、2030年には中大規模建築物について省エネ基準をZEB基準に引き上げる内容である。住宅・建築分野においては、徹底した省エネルギーによるエネルギー使用の効率化と再生可能エネルギー導入の最大化による電源の脱炭素化、グリーン水素の活用等が求められる。

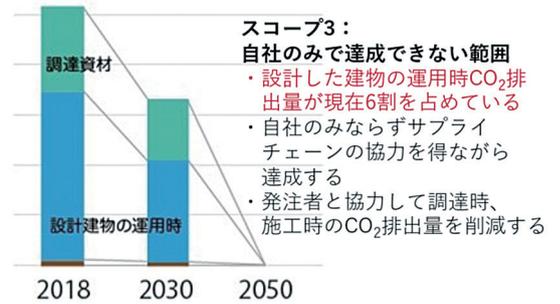


Fig. 11 当社スコープ3のCO₂削減目標
 CO₂ reduction target of our scope 3

4.2 当社におけるZEBへの取り組み

Our Approach to ZEB

我が国におけるZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）普及に向けた取り組みとして、2015年12月に公表された経済産業省の「ZEBロードマップ検討委員会とりまとめ¹⁷⁾」の中にZEBの定義が示されている。我が国では、単純に使用したエネルギーを再生可能エネルギーで賄うものではなく、室内環境の質を維持しつつ大幅な省エネルギー化を実現した上で、年間の一次エネルギー消費量の収支をゼロとする方針である。

Fig. 12は筆者らが考えるZEB実現へのアプローチである。高効率な照明機器やOA機器、無駄を省くための制御技術を導入し、内部消費・内部発熱を大きく削減する (①)。内部発熱が減ると冷房負荷は減るものの、これまで暖房負荷を相殺していた発熱も減ることになるため、外皮においては夏季の遮熱のみでなく、高断熱化や高气密化による暖房対策も重要になる (②)。空気質を維持するための機械換気は必要であることから、室内に取り入れる外気を高効率に処理したり、温熱環境調整の面では、室内の顕熱負荷が減少すると空気の冷却操作に伴う除湿が期待できなくなることから、温度と湿度の調整を高効率に行えることが重要になる (③)。これらへの対策を施し、消費エネルギーを最小化したうえで、太陽光発電等の再生可能エネルギーを活用しZEBを実現する (④)。

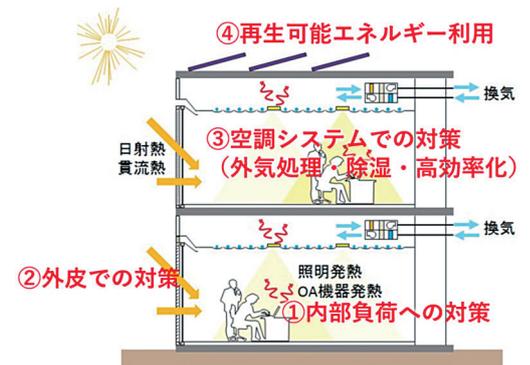


Fig. 12 ZEBへのアプローチ
 Approach to ZEB

*6 技術研究所 環境・社会研究部 社会システムグループ長 Group Leader, Research & Development Institute

*7 技術研究所 環境・社会研究部 地球環境グループ長 博士(工学) Group Leader, Research & Development Institute, Dr. Eng.

当社ではこれらに対応した技術を開発しており、以下に事例を紹介する。①に対応した技術として、明るさ感知制御による照明エネルギーの削減がある¹⁸⁾ (Fig. 13)。視野のある部分から目に入射する光の量を表す輝度値を明るさ感が損なわず、不快にならないようブラインドや照明の出力を制御するもので、竹中技術研究所研究棟に適用した実績として3割程度の照明エネルギー削減につながった。②に対応した技術として、断熱性が高く半透明なエアロゲルガラスがある¹⁹⁾ (Fig. 14)。2枚のガラスの中空層に9割以上が空気で構成されているエアロゲルを封入することで、30mmの断熱が施されたコンクリート壁以上の断熱性能と障子のような半透明性を確保しているのが特徴である。③に対応した技術として、天井内に設置可能な小型の調湿外気処理ユニットがある²⁰⁾ (Fig. 15)。考案した吸放湿機構により機器本体高さを450mmに抑えることで天井内にも設置可能としている。また、全熱交換機能を標準装備することで外気処理効率を高めている。④に対応した技術としては、有機系太陽電池一体型ルーバーの実証実験²¹⁾など、次世代太陽光発電技術の建築への適用に向けた技術開発に取り組んでいる。

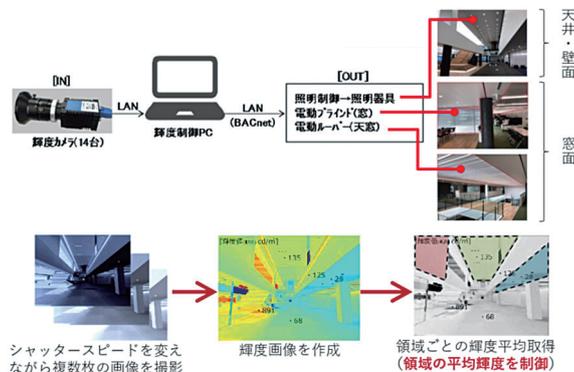


Fig. 13 明るさ感知制御システム
Brightness control system

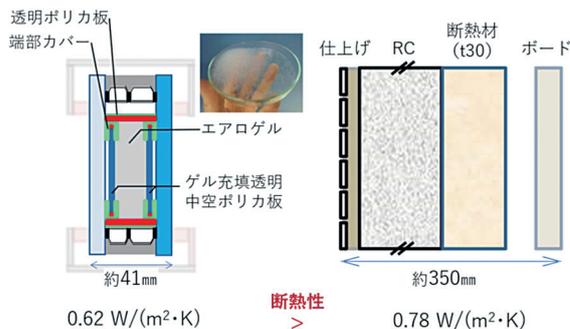


Fig. 14 エアロゲルガラス
Airgel glass

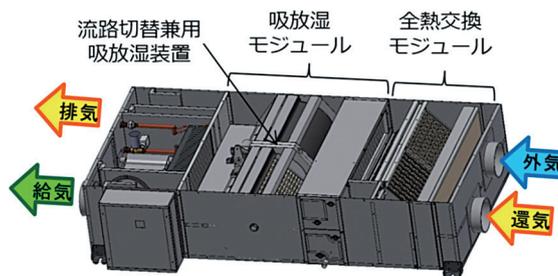


Fig. 15 調湿外気処理ユニット
Outside air treatment unit with humidity control

4.3 創エネルギーの当社の取り組み Our Approach to Create Energy

外食産業にて発生する食品廃棄物の再生利用率は、政府目標50%に対し、2013年以降40%程度で頭打ちとなっている²²⁾⁻²⁴⁾。食品廃棄物の再利用方法として、家畜の飼料や農作物の肥料への転換が多いが、食品残渣が発生する都市部において飼料や肥料の需要が小さいことが、食品廃棄物の再生利用が進まない一因として考えられる。一方で、都市部では、熱や電気などのエネルギー需要が大きいので、食品廃棄物などをメタン発酵処理により、バイオガスとして回収する方法には優位性がある。しかし、メタン発酵処理すると原料廃棄物と同等から倍量の消化液が発生する。これを都市部において液肥等で利用できないことは飼肥料の需要がないことと同じ理由で活用できず、ほぼ全量を処理する必要がある。加えて、既往の屋外でのメタン発酵装置と比べると装置規模が小さくなり採算性が課題となることから建物施設としてのバイオガスシステムの導入は進んでいない状況にある。そこで我々は、メタン発酵と厨房除害設備を組み合わせることで消化液処理に必要なコストを低減可能な建物完結型バイオガスシステム「メタファー



Photo 6 稼働中の商用化バイオガスシステム
Commercialized biogas system

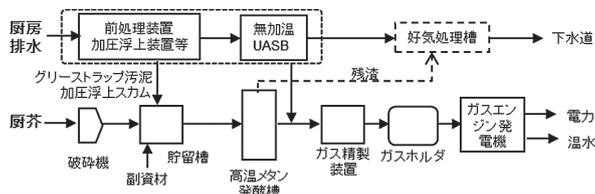


Fig. 16 改造システムのプロセスフロー
Modification system process flow

ム」を開発し²⁵⁾、2013年に厨芥処理量3t/日規模でも経済性を確保したシステムの実適用を開始した (Photo 6)。

商用運転を開始したメタファームであるが、外食店舗から発生する油分 (グリーストラップ汚泥)、油分分離のための加圧浮上槽を通過した厨房排水は当初除外して発酵を行っていた。しかし、いずれも少なくない有機分を含んでいること、それぞれ処理費が発生することから、これらを発酵原料に加えるための改良を加えた (Fig. 16)。その結果、初期モデルの商用機では、食品残渣の自家処理における費用削減で償却期間が14.6年となり、機器類の耐用年数の目安をされる15年ぎりぎりまでかかるのに対し、高油分を含む厨房排水を活用した改良システムの場合、6.7年まで短縮が可能であることを導き出した。また、自家処理によるCO₂排出量削減効果は、初期商用機で、73 t-CO₂/年削減に対し、改良システムでは、294t-CO₂/年となり、大幅な削減が見込めることを確認した²⁶⁾。

メタファームは、1~3t/日処理を想定しているが、それだけの食品廃棄物を排出する事業者は多くないため、小口排出者を対象として、小型化を図る開発と食品廃棄物の資源循環の枠組みに加わることができる創エネルギー型プロセスの開発も進めている。

4.4 カーボンニュートラル技術創出に向けた社内外連携

Internal and External Collaboration for the Creation of Carbon-Neutral Technologies

2021年初め、カーボンニュートラルに資する技術開発を加速させるため、研究所員全員を対象とし、カーボンニュートラルに関わる社内外の情勢、当社事業に関わる技術動向に関する情報共有を行い、研究開発アイデア創出のためのワーキング活動を開始した。ワーキング活動で立案された多数のアイデアをいくつかの категорияに分類し、研究開発の方向性を取り纏めた。6月および8月の2回に渡り、早稲田大学田辺新一教授およびNEDO環境部の有識者をお招きし、研究開発の方向性として「サステナブルカーボンサイクル技術」、「人の体験価値向上と環境配慮の両立を目指した建築・まちづくり」、「宇宙・フロンティアの活用技術」、「一度使った部材を長く使う」、「建造物にCO₂を長期固定する」について、パネルディスカッションを行った



Photo 7 パネルディスカッションの様子
Panel discussion

た (Photo 7)。次世代太陽発電の魅力や需要、アイデアの実証事業への実装、都市や人視点でのベネフィット、木造に必要な法的緩和、部材の長寿命化など白熱した議論が交わされた²⁷⁾。カーボンニュートラルに向けて、これまで建築業界が恩恵を受けてきた石炭エネルギーをただ置き換えるのではなく、ワーキング活動によって生まれたアイデアを発展・統合させて建築自体を変えていかなければならない。

5 サステナブルなまちの創生に向けて Toward the Creation of Sustainable Towns

浅見 泰司 Yasushi Asami*8

5.1 社会連携講座 Social Cooperation Research Program

2022年4月1日より株式会社竹中工務店と東京大学が連携し、東京大学大学院工学系研究科に「サステナブルなまちの創生」社会連携講座が設立された。この講座では、都市部における脱炭素・資源循環の活性化のために、建物・まちの空間構成の計画具現化、現状の建物、建物群、街区の脱炭素・資源循環を評価する手法の確立を目指した研究を行う。また、評価モデルの有効性を実証するために自治体、地域コミュニティ、地場企業との協創関係の構築を進め、「サステナブルなまち」コンセプトの啓蒙と普及を図る。そして、これらの活動を通じて、「サステナブルなまち」の実現に資する人材を育成することを目的としている。

この社会連携講座の設立を祝して、2022年7月14日に堀ビル・COT-Lab新橋にて設立シンポジウムが開催された。本稿では、社会連携講座の概要とシンポジウムでの報告の内容を紹介する。

5.1.1 「サステナブルなまちの創生」社会連携講座

東京大学における社会連携講座とは、公共性の高い共通の課題について大学と共同して研究を実施しようとする民間会社などから受け入れる経費等を活用して設置される講座であり、大学の自主性を保ちながら共通の課題について自由な発想で教育研究を行うものである。サステナブルなまちを創生していくことは、まさに、現在の日本、ひいては全世界が促進すべき社会共通課題であり、社会連携講座の設置趣旨に合致するものである。

「サステナブルなまち」に関わる研究をしている組織は東京大学内には多い。建設系工学については、工学系研究科内の建設系工学専攻群（社会基盤学専攻、建築学専攻、都市工学専攻）の他、新領域創成科学研究科、生産技術研究所、先端科学技術研究センターでも行われている。また、サステナブルなまちを実現するための様々な要素技術の研究に広げれば、工学系研究科内の機械系専攻、電気系専攻、システム創成学専攻、マテリアル工学専攻をはじめとして数多く、さらにサステナブルな社会を構築するための社会技術ともなれば、ほとんどすべての部局に関わるといっても過言ではない。今回の社会連携講座では、この中で、建築学専攻、都市工学専攻、新領域創成科学研究科、機械系専攻の教員に参画していただき、研究実施体制を構築した。

5.1.2 社会連携講座の研究実施体制

上述した社会連携講座に課せられた研究を実施するために、研究全体を統括する総括班と3つの研究領域を組織した（Fig. 17参照）。Fig. 17では、対象となる地域の空間スケールと技術要素の特徴の2つの軸で分けている。サステナブルなまちを研究対象にする場合に、街区スケールから都市全域や都市圏などといった広域スケールまで、考えることができる。また、サステナブルなまちを創生するときに必要な技術は、工学技術にとどまらず法制度・政策や市場といった社会技術まで含まれる。研究領域1は街区スケールかつ工学技術要素を中心に扱い、研究領域3は広域スケールかつ社会技術要素を中心に扱い、両者を結びつける研究領域として研究領域2を位置づけている。そして3つの研究領域を統括する総括班を全体をとりまとめる機能として位置付けた。

研究領域1は、まちの構成空間要素である街区環境をカーボンニュートラルに構築するための方法論を追求し、

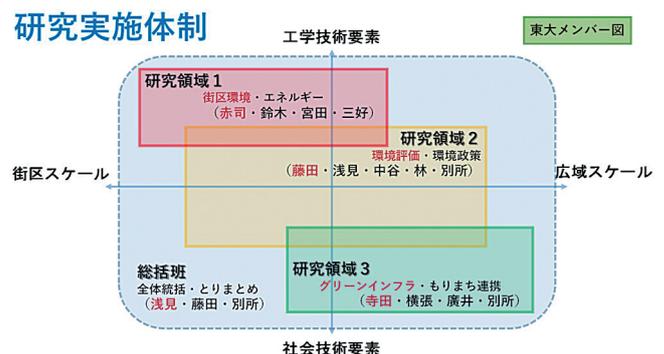


Fig. 17 研究実施体制図
Research Implementation Structure

*8 東京大学 大学院工学系研究科都市工学専攻 教授 Professor, Department of Urban Engineering, The University of Tokyo, Ph.D.

合わせてそれを支えるための環境発電や機器ネットワークを構築する技術を開発する。多くの場合に、街区には複数の建物が存在するための、建築群の連携の仕方が重要となる。街区のカーボンニュートラルを追求するとともに、ウェルネスも合わせて向上することが必要である。この点では、後述する研究領域2とも連携していくことが求められる。

研究領域2は、サステナブルなまちを評価するための評価体系の構築や、LCAを用いて環境配慮事業や施策による環境負荷削減効果を評価するための手法を開発する。すでに国内外でも既存のまちの評価ツールはあるが、評価体系が確立しているわけではなく、また、評価を行おうとする対象である地域の置かれた状態に応じて、適切な評価体系は異なってしかるべきである。研究領域2では特に日本の地域を評価するための体系に特化することで、より日本の社会ニーズに沿った体系の提案を試みる。

研究領域3は、都市部と郊外部をつないでサーキュラーエコノミーを実現するためのモデル化を行い、サーキュラーエコノミーの拡大によるカーボンニュートラル化、グリーンインフラの機能強化の効果を定量化を行う。一街区や一都市だけで環境的な部分最適を行うことは必ずしも広域的な視野から考えた場合に全体最適につながるとはいえない。他地域とサステナビリティを追求する努力をどのように分担するのか、また連携するのかを考えていかねばならない。そこで、河川の流域圏という広域のなかでのサーキュラーエコノミーのあり方を探求するのが研究領域3である。

5.2 サステナビリティ Sustainability

5.2.1 サステナビリティの概念

社会連携講座の活動のキー概念はサステナビリティである。サステナビリティという概念は20世紀の中ごろまではあまり重視されていなかった。地球は自己の活動範囲よりもはるかに大きなものとしてとらえられ、生活圈を内、それ以外を外として考えると、外の領域が広く広がっていると認識されていた。そのため、不要になったものや汚れたものは、「外」に捨てれば良いという発想になりがちであった。しかし、グローバリズムや環境・社会問題の広域化により、地球の限界性が認識されていった。地球が小さいということになれば、「外」の領域はなくなり、捨て先がないことになる。このことは必然的な資源循環の社会を構築し、欲望にまかせて活動を拡大することを抑制しなければならないことを示唆している。

1972年に出されたローマクラブの『成長の限界』(Meadows, et al., 1972)²⁸⁾は地球の有限性を社会に強く訴えたものであった。ローマクラブは、社会現象をシミュレーションするツールであるシステムダイナミクスという手法を用いて、このままの成長に任せておけば地球というシステムが崩壊すると警鐘を鳴らした。人口の増大、環境汚染の増大に比較して、食料の増産や環境回復力が限界をむかえ、世界が非常に不安定化することを示したのである。

小さな地球という概念は次第に国際社会で大きく取り上げられることになり、1987年には「我々の共通の未来」(Our Common Future)という報告書が国連で出され、持続可能な発展(Sustainable Development)という概念が確立した(United Nations General Assembly, 1987)²⁹⁾。この報告書では、“Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.”、すなわち、将来世代のニーズを満たす能力を奪わない現在世代の発展と定義されている。注意しなければならないのは、現状をそのまま維持することではなということである。現状に問題があれば正し、将来にわたる繁栄の可能性を高めていかねばならないのである。

5.2.2 サステナビリティの指標

持続可能性の概念はしばしばトリプル・ボトムラインと言われる環境、社会、経済の3側面から検討されねばならないとされている(浅見, 2022)³⁰⁾。我々の社会の基盤である環境が保全されていることが当然だが、人々の生活を支える社会面、経済面での活性が保持されることも必要となる。しかし、3側面に分類しても、なお、考えるべき項目は多岐にわたる。それでは、どのように細分類できるのだろうか。

これを端的に理解するためには、例えば国際標準で定められた指標群を見ることが有用である。ISO37120では、Sustainable development of communities — Indicators for city services and quality of life、すなわちコミュニティの持続可能な開発：都市サービスおよび生活質の指標群を定めている。まず、都市の概況をしるための概況指標(profile indicator)がある。これは、都市の持続可能性を評価するというよりも、都市規模、年齢別人口、世帯数、平均所得、

Table 1 ISO37120 の指標群
 Group of indicators defined by ISO 37120

	中核指標	補助指標
経済	都市失業率	フルタイムで雇用されている人の割合
	全不動産に占める商業用および工業用不動産の評価額の割合	若者の失業率
	貧困状態にある都市人口の割合	人口10万人あたりの事業数 人口10万人あたりの年間新規特許数
教育	学校に在籍している学齢期の女性人口割合	学校に在籍している学齢期の男性人口割合
	初等教育を修了した学生の割合	学校に在籍している学齢人口の割合
	中等教育を修了した学生の割合	人口10万人あたりの高等教育学位数
	初等教育の生徒／教師比率	
エネルギー	一人あたりの住宅の総電気エネルギー使用量 (kWh/年)	一人あたりの総電気エネルギー使用量 (kWh/年)
	認可された電気サービスを利用している都市人口の割合	顧客あたりの年間の平均停電回数
	公共建築物の年間エネルギー消費量 (kWh/m ²)	平均停電時間 (時間単位)
	都市の総エネルギー消費量に占める再生可能エネルギー源から得られる総エネルギーの割合	
環境	微粒子状物質 (PM2.5) 濃度	NO ₂ (二酸化窒素) 濃度
	粒子状物質 (PM10) 濃度	SO ₂ (二酸化硫黄) 濃度
	一人あたりのトンで測定された温室効果ガス排出量	O ₃ (オゾン) 濃度
		騒音公害 在来種の数の変化率
財政	債務返済比率(自治体の自己収入に対する債務返済支出の割合)	総支出に対する資本支出の割合 総収入に対する自己源収入の割合 請求税金に対する徴収税金の割合
火災や緊急時対応	人口10万人あたりの消防士の数	人口10万人あたりのボランティアおよびパートタイムの消防士数
	人口10万人あたりの火災関連死亡者数	最初の呼び出しから緊急応答サービスの応答時間
	人口10万人あたりの自然災害による死亡者数	最初の電話からの消防署の応答時間
ガバナンス	前回の地方選挙への有権者の参加 (有権者に対する割合)	都市政府の労働者に雇用されている女性の割合
	都市レベルの役職に選挙で選出された人における女性の割合	人口10万人あたりの都市当局における汚職および／または賄賂による有罪判決の数
		市民の代表性: 人口10万人あたりの選出された地方公務員の数 投票年齢人口に対する登録有権者の割合
健康	平均寿命	人口10万人あたりの看護・助産職員数
	人口10万人あたりの入院病床数	人口10万人あたりのメンタルヘルス専門家の数
	人口10万人あたりの医師数	人口10万人あたりの自殺率
	1,000人の出生あたりの5歳未満の死亡率	
レクリエーション		一人あたりの公共屋内レクリエーションスペースの平方メートル 一人あたりの公共屋外レクリエーションスペースの平方メートル
安全	人口10万人あたりの警察官の数	人口10万人あたりの財産に対する犯罪
	人口10万人あたりの殺人件数	最初の電話から警察署の応答時間 人口10万人あたりの暴力犯罪率
シェルター	スラムに住む都市人口の割合	人口10万人あたりのホームレスの数
		登録された法的権限がない世帯の割合
固形廃棄物	定期的に固形廃棄物を収集している都市人口の割合 (居住)	衛生的埋立地に処分される都市の固形廃棄物の割合
	一人あたりの収集される全都市固形廃棄物の量	焼却炉で処分される都市の固形廃棄物の割合
	リサイクルされる都市の固形廃棄物の割合	野焼きされる都市の固形廃棄物の割合
		オープンダンプ (投棄) で処分される都市の固形廃棄物の割合 他の手段で処分される都市の固形廃棄物の割合
		一人あたりの有害廃棄物発生量 リサイクルされる都市の有害廃棄物の割合
電気通信とイノベーション	人口10万人あたりのインターネット接続数	人口10万人あたりの固定電話接続数
	人口10万人あたりの携帯電話接続数	
交通	人口10万人あたりの大量公共交通システムのキロメートル	自家用車以外の移動モードを利用している通勤者の割合
	人口10万人あたりの軽旅客公共交通システムのキロメートル	一人あたりの二輪自動車の数
	一人あたりの公共交通機関の年間トリップ数	人口10万人あたりの自転車道および車線のキロメートル
	一人あたりの自家用車の数	人口10万人あたりの交通事故死者数 商用の航空接続数 (ノンストップの商用航空の目的地数)
都市計画	人口10万人あたりの緑地 (ヘクタール)	人口10万人あたりの年間植樹数
		市街地に対するインフォーマル集落の面積割合 仕事／住宅比率
廃水	廃水収集が提供される都市人口の割合	
	処理されていない都市の廃水の割合	
	一次処理を受けている都市の廃水の割合	
	二次処理を受けている都市の廃水の割合	
	三次処理を受けている都市の廃水の割合	
水と衛生	飲料水供給サービスを利用している都市人口の割合	一人あたりの総水消費量 (リットル/日)
	改善された水源への持続可能なアクセスを備えた都市人口の割合	世帯あたりの断水の平均年間時間
	改善された排泄物処理設備を利用できる人口の割合	水道の損失割合 (原因不明の水)
	一人あたりの国内総水消費量 (リットル/日)	

面積、降水量など都市がどのような状況にあるのかを表すものである。

例えば、都市間比較をする際に、あまりにも状況の異なる都市同士を比較してもあまり有意義ではない。概況指標は適切な対象群を見出すための補助的情報と考えればよい。本題の都市サービスおよび生活質の指標群については、経済、教育、エネルギー、環境、財政、火災や緊急時対応、ガバナンス、健康、レクリエーション、安全、シェルター、固形廃棄物、電気通信とイノベーション、交通、都市計画、廃水、水と衛生という17個に分類して指標群をそろえている（Table 1）。特徴的なのは、指標群を中核指標（core indicator）と補助指標（supporting indicator）に分けていることである。中核指標はどのような都市においても評価すべき指標、補助指標は必要に応じて追加で評価するための指標である。国際標準はあくまで、全世界で使われることを目指すものであるために、統計があまり整備されていない都市も対象にしなければならない。また、都市の特徴によっては不要な指標もありうる。そのような指標選択の柔軟性を補助指標を設けることで確保している。

街区に焦点をしばって持続可能性の観点から評価するツールとして、CASBEE-街区が日本で開発されている。Casbee-街区はトリプル・ボトムラインに基づいて街区の環境性能を評価したうえで、それを二酸化炭素排出量削減量と比較して分数型で評価するツールである（https://www.ibec.or.jp/CASBEE/CASBEE_outline/cas_ud.html）。2014年にリリースされたツールは現在、改訂作業に入っており、近日中に新たなツールが公開されることになっている。

5.3 社会連携講座設立シンポジウム Symposium on Establishment of Social Cooperation Research Program

以下では、2022年7月14日に開催されたシンポジウム（Photo 8）の内容を紹介する。

5.3.1 設置趣旨等

冒頭に、会場となった堀ビル・COT-Lab新橋の有志での館内見学があった後、染谷隆夫東京大学大学院工学系研究科長と村上陸太竹中工務店常務執行役員から開会のご挨拶があった後、浅見から社会連携講座の設置趣旨を述べた。その後、竹中工務店より連携講座に期待することの披露があった。

カーボンニュートラルが大きな達成目標であることはもちろんだが、同時に心地よさを追求したいということ、また、DX面での進展の期待も述べられた。

5.3.2 研究領域1からの報告

赤司泰義東京大学大学院工学系建築学専攻教授が、研究領域1の研究計画について報告した。この領域の目的は、建築群連携と自律的環境行動を支えるスマートインフラを基盤としたカーボンニュートラル街区構築の方法論を構築することであり、また、その成果をもとにサステナブルで魅力ある街区のためのカーボンニュートラル化の方法を提示し、その社会実証・発信を行うことを予定している。この研究においては、3つの重要な視座がある。第一に、建築群連携によって、建築単体の足し算では得られない街区全体での最適化を目指すこと。第二に、二酸化炭素削減だけでなく、コストやウェルネスといった多視点でのKPIを設定して評価しようとしていること。第三に、状況の変化に適切べく、データ駆動でのサービス開発や導入の基盤づくりを目指していること。以上の3点である。

建築群連携のためには、個々の建築の組合せから生じる街区の形態とエネルギー需要の特性を把握した上で、再エネ・蓄エネの導入と運用の街区最適化によるCO₂排出量を最小化しなければならない。また、空間設計に役立てるためには、働き方の変化に応じた、外部空間の活用による需要削減の効果や内部空間の共用による需要の偏在化で再エネ適応性についても検討する必要がある。

また、次世代に引き継ぐようなカーボンニュートラル街区にするには、少なくともコストとウェルネス（快適性、健康性、生産性とそれによる満足感）を伴い、まちに住む人、訪れる人にとって魅力ある仕掛け、日常生活に根づく仕掛けによって、自律的に環境にやさしい行動が生まれるようにすることが必要となる。このために、どのよう



Photo 8 シンポジウムの様子
Atmosphere of the Symposium

なKPIを設定し、どのように評価をするかが研究課題となる。

さらに、昨今の急激な社会的変化や居住のあり方も変化を鑑みると、最初に建築をつくり込んでも運用で対応できていないという問題がある。そのため、変化に応じて建築や建築群が適応し、さらにはアップグレードできるデータドリブンな仕組み、様々なサービス（価値）を提供できる仕組みを検討していかねばならない。

本研究は、カーボンニュートラル化の達成を目指しつつ、デジタル化に基づくデータ駆動の新技术を組み込んだプロジェクトであり、社会的インフラとしてのデータ活用（センシングやシェアリング）に対する制度的な課題にも取り組みながら、次世代の「まち」（街区）に向けた先進的な提案（政策、ビジネス）を行うという点で、先進性があるといえる。

5.3.3 研究領域2からの報告

藤田壮東京大学大学院工学系都市工学専攻教授が、研究領域2の研究計画について報告した。

この領域の目的は、地域脱炭素効果に加えてSDGs地方創生指標、ウェルビーイング指標等の統合的な評価体系を確立することで、国の都市構想も参考にしつつ、脱炭素等の地域ビジョン全体の達成を支援することを目指すものである。指標の検討にあたっては、先述したISO37120やCASBEE-街区などの既存指標群も参考としつつ、新たなまちのウェルビーイング評価指標群を提案しようとしている。また、脱炭素・持続可能なまちづくりの計画のための評価支援システムを開発する。これにより、脱炭素先行地域の自治体等への社会実装的な出力プロセスの検討が可能になると考えている。

5.3.4 研究領域3からの報告

寺田徹東京大学大学院新領域創成科学研究科自然環境学専攻准教授が、研究領域3の研究計画について報告した。

この領域の目的は、都市と農林業を結ぶサーキュラーエコノミーモデルとして埼玉県小川町をケースに構築し、カーボンニュートラルや生態系サービス、防災の点から評価することで、建設事業の今後の領域拡大や社会課題対応のあり方を示そうというものである。小川町は埼玉県のほぼ中央、荒川流域圏に位置し、山林にも広く覆われている町である。具体的な研究内容としては、サーキュラーエコノミーのモデル化のための構成要素の調査を行い、循環フローのモデル化を行う、サーキュラーエコノミーの拡大による低炭素効果を定量化する、森林・農地の生態系サービスについてシミュレーションを行いサーキュラーエコノミーの環境面への貢献を定量化する3つの研究を進める。学生の演習や住民ワークショップなども行いながら、教育的な貢献も同時に行う予定である。

5.3.5 討論・総括

上述の発表に続き、休憩をはさんで総合ディスカッションが行われ、その後、総括、閉会挨拶を経て閉会した。

総合ディスカッションでは、個別技術に関する質疑の他、領域間の連携方法に関する議論、ウェルビーイングを深める議論、地域をつなぐ発想の議論などがなされた。

総括としては、部分を追求しながら全体最適につながるような仕組みづくりの可能性があること、災害時と平常時などの状況に応じて生活圏の大きさが変化するが多様な圏域でも生活を維持できることがウェルビーイングを考えるうえでも重要であることなどが述べられた。

6 おわりに Conclusion

奥田 信康 Nobuyasu Okuda*1

本稿では、地球温暖化の現状と建築業としての対策の必要性を示し、気候変動対応、カーボンニュートラル実現に向けた当社の取り組み状況、及びサステナブルなまちの実現に向けた新たな共同研究の取り組み状況について具体的な技術検討事例を交え概説した。

気候変動への取組では、適応策として開発した数値風洞Kazamidoriを建築プロジェクトに適用を開始し、有効性を確認しているとともに、ウェザーニューズ社らと「将来気候変動リスクの抽出とこれら高度評価技術を持続可能な都市開発への活用検討」に関する共同研究を進めている状況を紹介した。

カーボンニュートラル実現の取組では、建物を作る際にCO₂排出量の大きいコンクリートを対象とした開発技術として、2014年から実用化したECMコンクリート（CO₂排出量削減率60～70%）の適用実績と現在開発を進めているカーボンネガティブコンクリートの開発コンセプトを紹介した。これら技術の社会実装を促進するために、ゼネコン・メーカー・商社・大学研究機関など55事業者で構成されるGIコンソーシアムを立ち上げた。また、建物ライフサイクルCO₂の内6割を占める建物運用時に対しては、当社のZEBの考え方及び空調・照明・断熱・太陽光発電などの様々な技術の活用状況を示すとともに、食品廃棄物の処理とエネルギー変換技術としての建物完結型バイオガスシステムの活用状況を紹介した。さらに、2021年度には技術研究所所員全員を対象としたカーボンニュートラル技術創出のアイデア検討会を開催し、研究開発の方向性を取りまとめた。検討会は、社内関係部署に加え、早稲田大学田辺教授やNEDO環境部にも参加いただき、活発な討議が交わされた。

2022年4月に東京大学大学院工学系研究科に「サステナブルなまちの創生」社会連携講座が設立された。この講座では、都市部における脱炭素・資源循環の活性化のために、建物・まちの空間構成の計画方法やサステナビリティの評価手法の確立を目指した研究を行う。当社と東京大学との共同研究により、サステナブルなまちのコンセプトの啓蒙と実証事業提案を目指している。

なお、現時点ではカーボンニュートラル実現の道筋は確定しておらず、技術的課題や社会システム上の課題などが山積しており、我々が気候変動対応やカーボンニュートラル実現を目指すためには、社内関係部署はもとより、様々な企業や研究機関より協力を得ることが必須となる。今後は、本稿で紹介した技術をさらに発展させ、早期の社会実装を推進するとともに、カーボンニュートラル実現に加えて同時に様々な社会課題も合理的な解決方策の検討・実装を推進し、サステナブルなまちの実現を目指したい。

参考文献

第1章

- 1) 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第6次評価報告書 第1作業部会報告書 (自然科学的根拠) 政策決定者向け要約 (SPM) の概要 (ヘッドライン・ステートメント), <https://www.env.go.jp/content/900501857.pdf> (2022年8月28日時点), 2021年8月
- 2) 環境省, 脱炭素ポータル 国の取組, https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/road-to-carbon-neutral/ (2022年8月28日時点)
- 3) 一般財団法人建築経済研究所, 社会資本分野において建設業等が取り組むべき脱炭素社会実現のための方策, 建築経済レポート, No.74, pp.254-255, <https://www.rice.or.jp/wp-content/uploads/2022/03/2.3p246276.pdf> (2022年8月28日時点)
- 4) 竹中工務店, リリース「2050年カーボンニュートラル実現に向け, CO₂削減長期目標を改定」, <https://www.takenaka.co.jp/news/2021/03/01/> (2022年8月28日時点), 2021年3月

第2章

- 5) 文部科学省, 気象庁:「日本の気候変動2020-大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書-」, 2020年.
- 6) 環境省, 文部科学省, 農林水産省, 国土交通省, 気象庁:「気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート2018~日本の気候変動とその影響~」, 2018年.
- 7) 太田皓陽, 二瓶泰雄, 伊藤毅彦, 川瀬宏明, 佐山敬洋, 中北英一:「令和元年東日本台風荒川上流域の洪水氾濫状況への気候変動影響評価」, 土木学会論文誌 B1 (水工学), 77 (2), I_1-I_6, 2021年
- 8) 畔上泰彦, 田中英之, Doan Quang-Van, 日下博幸:「2019年19号台風を対象とした現在気候と将来気候下での強風及び建物面の風荷重に関する解析」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.2045-2046, 2021年.
- 9) Kimura, F., & Kitoh, A.:「Downscaling by pseudo global warming method. The Final Report of ICCAP, 4346, pp.463-478, 2007.
- 10) Mizuta, R. et al.:「Over 5,000 years of ensemble future climate simulations by 60-km global and 20-km regional atmospheric models」, Bulletin of the American Meteorological Society, 98 (7), pp.1383-1398, 2017.
- 11) Fujita, M. et al.:「Precipitation changes in a climate with 2-K surface warming from large ensemble simulations using 60-km global and 20-km regional atmospheric models」, Geophysical Research Letters, 46 (1), pp.435-442, 2019.

第3章

- 12) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構HP: https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101541.html
- 13) 経済産業省資源エネルギー庁, 製造産業局:「グリーンイノベーション基金事業「CO₂を用いたコンクリート等製造技術開発」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画」, 令和3年10月15日
- 14) 日本建築学会材料施委員会:「鉄筋コンクリート造建築物の限界状態再考-中性化は寿命か?-」, 日本建築学会材料工部門パネルディスカッション資料, 2017年9月
- 15) 竹中工務店プレスリリース:「NEDOグリーンイノベーション基金事業『CO₂を用いたコンクリート等製造技術開発』鹿島・デンカ・竹中工務店を幹事会社とするコンソーシアム本格始動」, 2022年6月17日, <https://www.takenaka.co.jp/news/2022/06/03/>

第4章

- 16) 国土交通省 脱炭素社会に向けた住宅・建築物の省エネ対策等のあり方検討会:「脱炭素社会に向けた住宅・建築物の省エネ対策等のあり方・進め方」, 2021年8月
- 17) 経済産業省資源エネルギー庁省エネルギー対策課:「ZEBロードマップ検討委員会とりまとめ」, 2105年12月
- 18) 畑中健, 田中宏治, 徳村朋子, 菊池卓郎, 市川重範, 篠山千之, 成田瑞恵:「明るさに配慮した施設リニューアルの計画と実施(その1)」, 照明学会全国大会講演論文集, 2020年
- 19) 井原健史, 大庭慶義, 山本正人, 杉田敬太郎, 儀部真二, 中島奈央子:「シリカエアロゲルを用いた外装システムに関する研究(その1)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2021年9月
- 20) 菅野博徳, 篠原正明, 加藤洋幸, 小澤優介, 和田一樹:「再生可能エネルギー熱を活用した調湿空調システムに関する研究(その9)」, 空気調和, 衛生工学会大会学術講演論文集, 2018年9月
- 21) 徳村朋子, 出口嘉一, 黒木友裕, 張ヶ谷浩一, 田中規敏:「太陽電池一体型外装材を用いた外装システムの省エネルギー性能に関する研究(その2)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2015年9月

- 22) 農林水産省, 平成30年度食品リサイクル法に基づく定期報告の取りまとめ結果の概要, 2019年
- 23) 農林水産省, 平成28年度食品リサイクル法に基づく定期報告の取りまとめ結果の概要, 2017年
- 24) 農林水産省, 平成26年度食品リサイクル法に基づく定期報告の取りまとめ結果の概要, 2015年
- 25) T. Kato, M. Inoue, Y. Yamazaki, F. Iba and N. Shiota : 空気調和・衛生工学会大会, 平成27年度大会 (大阪) 学術講演論文集 第10巻 都市・環境編, E-3, 2015年
- 26) 環境省, 令和3年度CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業, 無加温UASB法による厨房排水からのバイオガス回収に関する技術開発報告書, 2022年3月
- 27) https://www.takenaka.co.jp/rd/carbon/attempt/discussion2021_02/ (2022年8月6日閲覧)

第5章

- 28) Meadows, Donella H., Dennis L. Meadows, Jørgen Randers, William W. Behrens III: *The Limits to Growth; A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York: Universe Books, 1972
- 29) United Nations General Assembly: "*Report of the World Commission on Environment and Development : Our Common Future*"; Transmitted to the General Assembly as an Annex to document A/42/427 – Development and International Co-operation: Environment; Our Common Future, Chapter 2: Towards Sustainable Development; Paragraph 1". United Nations General Assembly, 1987
- 30) 浅見泰司: 「都市の持続可能性の評価」後藤・安田記念東京都市研究所 (編) 『都市の変容と自治の展望: 公益財団法人後藤・安田記念東京都市研究所創立100周年記念論文集』公益財団法人後藤・安田記念東京都市研究所, 東京, pp.245-267, 2022年