2.2.11 都市環境サステナビリティ（気候変動適応、感染症、健康）

（1）研究開発領域の定義

都市環境のサステナビリティに関する領域である。気候変動や感染症、自然災害などが都市環境に与える影響の予測と評価、それらを基盤にした都市レジリエンスの向上策や適応シナリオ構築を扱う。加えて、都市住民の健康、QOL、ウェルビーイングに関する研究開発や社会実装の取り組みを扱う。

気候変動への適応に向けて、気候変動が及ぼす影響を空間詳細化する解析手法や、地域住民協働に資する視覚化手法などを対象とする。それらを基盤とした暑熱や極端気象に備える都市計画シナリオ構築、自然災害への防災行動計画等も含める。感染症への環境防御については、都市環境学、都市工学的知見を生かした健康への影響予測、評価、対策を扱う。（医療そのものは扱わないが、公衆衛生は一部含む。）都市住民の身体、精神、社会的といった多面的健康について、都市ヒートアイランド現象と地球温暖化がもたらす暑熱や都市環境に対する研究を扱う。暑熱対策技術に加え、都市の自然が都市住民に与える影響の解析手法や影響の評価、予測を含む。

（2）キーワード

■気候変動への適応（都市防災を含む）

気候変動適応策、温暖化ダウンスケーリング、予測不確実性、自然災害（洪水、台風、干ばつなど）、防災、グリーンインフラ、都市緑地

■都市環境における感染症への防御（医学を除く都市工学、都市環境学的側面）

公衆衛生、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）、感染経路、換気、空調、建築環境、感染性エアロゾル、気流計画、ろ過、紫外線照射殺菌（UVGI）、テレワーク（在宅勤務）、中央商業地区、ベッドタウン

■都市環境における健康、暑熱対策等

健康、都市ヒートアイランド現象、熱中症、熱関連超過死亡（熱波、熱中症）、暑さ対策、自然体験、環境心理学、予防医学、低栄養、下痢性疾患、動物媒介感染症（デング熱、マラリアなど）、Co-benefit（共便益）、ライフスタイル転換、超高齢社会、SDGs、地方自治体

（3）研究開発領域の概要

［本領域の意義］

■気候変動への適応（都市防災を含む）

IPCC第４次評価報告書、第５次評価報告書で述べられている通り、気候システムの温暖化には疑う余地がない。2021～22年公表予定の第６次評価報告書でも、この見解は踏襲される見通しである。太古から続く気候変動の中で、現在は「温暖化」のフェーズにある。世界の平均気温は、最近100年間で0.74℃上昇している。今世紀末には1986～2005年平均と比較して最大で4.8℃上昇するという最悪ケース予測シナリオも提示されている。温室効果ガス（GHGs）の大気中平均存在寿命は長期に渡ると推定され、温暖化が不可避の状況下に既にある。 GHGs排出量が即座には減少せず、ますます深刻化する将来に向け、エネルギー高効率化、エネルギー転換等の「緩和」努力に加え、温暖化を前提とした「適応」も欠かせない[適応1)]。2015年に採択されたパリ協定の第７条でも、気候変動「適応策」の強化が明確に位置付けられた。気候変動影響評価とは、ハザード（危険な事象）、曝露（影響を受ける可能性のある人的・物的損害の大きさ）、脆弱性（損害の受けやすさ）の観点から気候変動による影響をリスク評価する手法である。影響予測はモデルを用いて

行う。リスク評価はIPCC第５次評価報告書の主要なリスクの特定の考え方から、基本的に「重大性」「緊急性」「確信度」の観点で行う。

GHGs増大が気候変動に影響する結果として、地球温暖化が進行し、社会的・経済的な影響が顕在化している。とりわけ、中緯度地域では豪雨の頻発化や熱帯低気圧（台風、ハリケーン等）の激甚化などをもたらす確信度は高いと考察されてきた。実際、我が国では台風や豪雨による洪水災害の頻発化、激甚化などが身近に現れている。生命への危険に加え、経済的損失も甚大化している。持続可能な都市環境のためには、「適応策」の能力向上として、気候変動の影響に対する強靭化と脆弱性の減少が求められる。「適応策」はあらゆる分野に関わり、その内容・優先順位は地域ごとに異なる。気候変動の将来予測、その地域レベルへのダウンスケール、その結果を踏まえた地域への影響予測、地域特有の脆弱性とリスク評価、対策技術、社会実装など、多岐に渡る研究と活動が求められる[適応2)]。自然災害に対する防災対策は、既存の防災策に、適応策をあわせたものとせざるを得ない。個別、単体での技術開発はこれまでに進められているが、システムとしての社会実装はあまり進んでおらず、課題がある。さらに台風による停電中の熱波の襲来、感染症蔓延下での酷暑や洪水災害といった複合災害への対策は、これまでは現実に起こるものとして、十分ではなかった。今後、早急に研究と行政的対応を進めていく必要がある。

■都市環境における感染症への防御（医学を除く都市工学、都市環境学的側面）

2019年末、中華人民共和国の武漢から新型コロナウイルス感染症（COVID-19）が広がり、パンデミック（世界大流行）となり、欧州各国では医療崩壊も起こった。 COVID-19を引き起こす病原体は新型コロナウイルス（SARS-CoV-2）である。2020年11月現在、米国をはじめ各国で感染者・死亡者が増加し続けている（2020年11月18日時点のジョンズ・ホプキンス大学集計データで感染者数5500万人以上、死亡者数130万人以上）。これは気候変動の健康影響を考慮する上でも大きな課題となっている。 COVID-19による社会的・経済的への影響も深刻で、日本の2020年４～６月期GDP年率は-27.8%と戦後最悪のマイナス成長になった。感染症を防止するための対策は社会的・経済的において極めて大きな意義を持つ。

ここで、この100年間で感染症によるパンデミックは継続的に発生している事実を直視しなければならない。1918～1919年のスペンイン風邪（死者約4000万人）、1957～1958年のアジア風邪（死者数200万人）、1968～1969年の香港風邪（死者数100万人）、2009～2010年の新型インフルエンザ（死亡者数約28万人）は、いずれもインフルエンザウイルスによるパンデミックだった[感染1)，2)]。

近年の都市計画、建築環境学での都市レジリエンスは地震や気候変動で激甚化が予想される自然災害リスクへの対策を専ら検討してきていた。 COVID-19パンデミックは感染症リスクに対するレジリエンスも向上させなければならないという使命を、都市環境サステナビリティに対して突き付けたものと受け止められる[感染3)]。中世、近代の西欧の都市計画では、当時原因がわからなかったペストやコレラといった感染症に対して、都市中核の公衆衛生を高める都市大改造が行われた。その正の側面と対となる負の側面として、富裕層がグリーンベルトに囲まれた田園郊外住宅を形成し、低所得層が密集したスラム街が形成されるといった格差の構造が固定化される問題が現実として起こった。また、気候変動の影響を世界的に見ると、下痢性疾患による死亡者数の増加や、感染症を媒介する生物の生息可能域の拡大などを通じたマラリアやデング熱による死亡の増加がもたらされると予測されている[感染4)]。 COVID-19や気候変動の影響を踏まえた今後の都市計画はそのような過去の歴史を踏まえつつ、より良い長期展望を元にした検討が求められる。一部のみが利益を享受する社会ではなく、包摂性（インクルーシブ）や冗長性（リダンダンシー）、多様性（ダイバーシティ）を一層高めた都市機能の構築に貢献していく必要がある。

■都市環境における健康、暑熱対策等

2015年の国連サミットにて、「我々の世界を変革する：持続可能な開発のための2030アジェンダ」が採択された。その中核が17のゴール、169のターゲットで構成された持続可能な開発目標（SDGs）である。SDGs達成に向けて産官学民をあげた取り組みが行われる中で、研究開発の世界でもSDGsの達成に貢献し得る研究が増加している。都市環境サステナビリティにかかわる領域においてもSDGsは注目を集めている。

SDGsでは都市に直接的に関わるゴール11「住み続けられるまちづくりを」が存在する。ただし、SDGsのゴールは互いに連関しているため、ゴール11単独での解決のみ模索するのは不十分で、トレードオフを抑制し、シナジーを最大化する統合的な解決方法の検討が必要不可欠である。例えばCOVID-19のパンデミックは都市の過密化と集住が被害を大きくしている側面があり、都市問題（ゴール11）と住民の健康問題（ゴール3）を同時に考慮しなければならない。近年、我が国では熱中症搬送者数が急増しているが、これも地球温暖化（ゴール13）とヒートアイランド現象（ゴール11）と住民の健康問題（ゴール3）を同時に検討しなければ有効な解決策は見出せない。気候変動に起因する災害も脆弱な都市で被害が大きくなる傾向があることから、統合的に都市のレジリエンス性を向上させることが求められている（ゴール9・11・13）。また、都市緑化は都市問題（ゴール11）と住民の健康（ゴール3）と陸域生態系の保護（ゴール15）に直接的に効果をもたらし、他にも間接的に関連する目標が含まれる。このように、SDGsの17のゴールを用いて都市環境を俯瞰することで様々な課題とその連関が明確化される。都市環境に関わる課題を統合的に解決し得る研究開発が進めば、結果としてSDGsの達成にも大きく貢献し得る。

ここで、一般に混同される傾向があるため強調する必要がある事実として、全球的な気候変動の影響が表れるよりも以前から、都市気候においてはヒートアイランド現象による暑熱が課題として顕在化しており、現在も課題であり続けているという点がある。都市ヒートアイランド現象の緩和策としてクールルーフ、屋上緑化、人工排熱削減などの技術が開発されている。都市ヒートアイランドへの適応策として日射遮蔽、ミスト噴霧などによる暑さ対策に関する研究や実践がこれまでに蓄積されている。なお、気候変動の影響は多岐にわたるが、地球温暖化がもたらす熱ストレスによる影響は特に重要である。つまり、都市ヒートアイランド現象の影響に、さらに気候変動の影響が加わっている。それにより、世界的に熱ストレスによる死亡数の増加が予測されている。日本のような超高齢社会では特に、熱的快適性の議論にとどまらず、健康維持と生命維持のために暑熱対策が不可欠となる。適応策として世界の人口の半分以上が「都市」に居住している現在[健康1)]、ライフスタイルの転換は多くの場合、都市生活に注目して考える必要がある。ライフスタイルの転換は、クールビズを一例として、従来の慣行からの転換を促すものも含まれる。その際、従来の慣行や現時点の観点に縛られることなく、温暖化した将来の都市気候を前提として、より良い都市計画に貢献していく必要がある。

近年、COVID-19以外でも、世界的にがん・糖尿病・循環器疾患・呼吸器疾患等の生活習慣の改善により予防可能な疾患である非感染性疾患の患者数が増加している。また、うつ病や不安症状等の精神疾患の患者数も増加している。特にうつ病の人は世界で推計3億人以上に上るとみられている。こうした非感染性疾患・精神疾患の蔓延は、人々の寿命や生活、生涯の質（QOL：Quality of Life）を低下させるだけではなく、社会に対して甚大な経済的・社会的コストをもたらす。そのため、これらの疾患を減少させることが大きな社会的課題となっている。近年、都市の自然（都市近郊林や緑地、里地里山、街路樹、屋上緑化等）は上記の疾患の拡大防止に貢献し得ることが指摘されている。実際に、身近な自然との関わり合い（緑地の訪問や街路樹を眺めること等）は人々に様々な健康便益（身体、精神、社会的健康便益）をもたらすことが明らかになってきている。現代社会に蔓延する非感染性疾患や精神疾患の減少に対しても、都市の自然がもたらす多面的効果を明らかにして、より良い活用方策を講じる必要がある。

［研究開発の動向］

■気候変動への適応（都市防災を含む）

• 温暖化ダウンスケーリング

気候変動が都市生活や住民の健康に及ぼす影響を予測・評価するためには、温暖化を適切に解析・予測できるシミュレーションモデル開発が不可欠である。シミュレーションモデル開発では、文部科学省「人・自然・地球共生プロジェクト：温暖化予測「日本モデル」ミッション」（2002～2006年度）の成果がIPCC第4次評価報告書に、「21世紀気候変動予測革新プログラム」（2007～2011年度）の成果がIPCC第5次評価報告書に対して大きく貢献している。「気候変動リスク情報創生プログラム」（2012～2016年度）、「統合的気候モデル高度化研究プログラム」（2017年度～）の成果もIPCC第6次評価報告書（2021～22年公表予定）への貢献が期待されている。

全球気候モデルの空間解像度は通常100 km～数100 km程度の空間平均値であり、そのままでは都市生活や住民の健康への影響予測・評価に用いられない。そのような空間解像度のギャップを埋めるために開発されてきたのが「温暖化ダウンスケーリング」と呼ばれる技術である。ダウンスケーリングは空間詳細化を意味する。全球気候モデルの出力結果をより高解像度のシミュレーションモデルを用いて空間詳細化を施す力学的ダウンスケーリングと、広域の気象場と局所の気象要素の経験的・統計的関係に基づいて空間詳細化を施す統計的ダウンスケーリングの2つの手法に大別される[適応3)]。「適応」を主眼とした文部科学省「気候変動適応研究推進プログラム」（2010～2014年度）と環境省「環境研究総合推進費S-8：温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究」（2010～2014年度）の中で世界をリードする温暖化ダウンスケーリングモデルの先導的な開発研究が進められた。特に、「気候変動適応研究推進プログラム」で開発された温暖化ダウンスケーリングモデル[適応4), 5)]は、世界でも類を見ない空間詳細度であり、地球スケールから大陸・国スケール、地域スケール、都市スケール、街区・建物スケールに至る気候・微気候を段階的かつ連続的に解析・予測可能なモデルとなっている。これは建物3次元情報などの街区ビル構造などもモデルに取り込んでおり、都市計画の相違による将来影響も予測できる。このような研究成果によって初めて、地球規模の温暖化が都市生活や住民の健康に及ぼす影響を、局所的な都市ヒートアイランドの影響と合わせて定量的かつ詳細に予測・評価でき、適応の具体的な方策を検討できるようになった。このように温暖化ダウンスケーリングモデルは、深刻化するこれからの温暖化時代において特に有効な環境影響予測・評価ツールである。温暖化ダウンスケーリングモデルは、既に、将来の都市暑熱環境下の健康被害の推定[適応6)]や、暑熱環境に適応する都市・街区計画の検討[適応7)]などに応用され、都市計画などの政策決定に向けても数々の重要な知見を提供している。

■都市環境における感染症への防御（医学を除く都市工学、都市環境学的側面）

• COVID-19の感染経路に関する多角的な調査研究

感染症は感染源、感受性宿主、及び感染経路の3つの要素が揃えれば成立する。COVID-19の主な感染経路は飛沫感染と接触感染であるとみられているが、人が密集するレストランなどの集団感染事例から、WHO（世界保健機関）は感染経路として飛沫感染と相まって屋内エアロゾル感染の可能性が否定できないことを認めている[感染5)]。室内におけるSARS-CoV-2などの感染性エアロゾルの挙動の解明や、その感染症リスクの予測はその対策において極めて重要である。

現在SARS-CoV-2の感染経路の解明やその感染リスクの評価について、世界各国で疫学調査・環境調査など多くの側面から研究が行われている。その成果が猛スピードで公開され、2020年11月18日現在medRxivとbioRxivで公開されているCOVID-19関連のpreprint論文数は1万件を超え、そのうちの一部

は既にトップジャーナルなどに採用され公開されている。

• COVID-19拡大防止のための移動抑制策が与える多面的な影響

COVID-19の拡大防止のために、これまでのように自由なグローバルレベルでの往来が不可能になっている。ワクチン開発などの予防体制がある程度奏功すれば元に近い状態に戻せる可能性も考えられるが、類似の感染症が出現する可能性を念頭に置いた対応を長期化させざるを得ない。そうすると、航空機や鉄道による移動の大幅な減少、在宅勤務の増加などのため、温室効果ガス排出総量は緩やかになるものとみられる。気候変動緩和策としては有利となる一方、大都市への人口集中から地方分散へと舵も切られていく。そのような多角的な観点を考慮に入れ、将来シナリオを構築する必要が生じている。

また、密閉空間での密集勤務、満員電車での集団感染を避けるべく、ICTの普及を背景にテレワーク（在宅勤務）が世界各都市で一挙に取り入れられた。大都市の中心業務業地区（CBD：central business district）とその郊外のベッドタウン、地方都市それぞれで空間の使い方が大きく変容している。特にベッドタウンは密集度が高く、高齢化も進展している中で、テレワーク勤務者と居住者が混在する新しい状況が生まれている。今後の都市再生方策を考えるうえで、既存のポテンシャルを生かしながら、単一機能ではなく冗長性を持たせた都市計画を検討、実装していく必要に迫られている[感染6)]。

• COVID-19が都市計画に与える多面的な影響

都市計画においても、COVID-19は近年専ら関心を持たれてきた自然災害リスクと異なる感染症リスクを世界中に突き付けた。感染症に絶えずさらされてきた熱帯地域と異なり、日米欧は1918～1919年のスペイン風邪以来の最悪のパンデミックであり、都市に対する固定観念や価値観の変容を与えている。感染症は人間が密集し、多く交流する都市の脆弱性をつくことは自明であった。 COVID-19に晒されるwithコロナ、COVID-19抑制後の将来のpostコロナ時代においても、COVID-19以前の都市の在り方への回帰は難しい。むしろより良い復興（BBB：Build Back Better）を検討し、提示していく必要がある。

• 気候変動の影響に伴う再興感染症への懸念

温暖化によりツンドラ地帯の永久凍土が溶解することで、凍結していた過去の病原体が再び自然界に放出され、感染症を引き起こす可能性が懸念されている。 COVID-19類似の感染症によるパンデミックを防ぐべく、生態系保全やツンドラ地帯での慎重な研究が必要である。

• 超過死亡推定法のさらに精緻な解析

COVID-19の影響を評価するにあたり、従来の超過死亡推定法を用いた推定がなされている。しかし、インフルエンザや気温の影響によっても死亡状況は変動するため、これまで行われてきた熱関連超過死亡の応用を含む、より精緻な解析が求められる。

■都市環境における健康、暑熱対策等

• SDGsを活用した分野横断的な研究

解決することが容易なsimple problemsでも、解決することが困難なcomplex problemsでもない、問題を定義することすら困難なwicked problemsが増えている。都市環境サステナビリティに関わる諸課題もまさにwicked problemであり、唯一解は存在せず、分野の垣根を超えた関係者による協働が重要である。

このようなwicked problemに立ち向かうためにSDGsを活用した分野横断的な研究が広がりを見せている。

科学技術振興機構（JST）と日本医療研究開発機構（AMED）、国際協力機構（JICA）の「地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）」では、各プロジェクトがSDGsの達成にどのように貢献するかを明確化するよう求めている。これに続き、2019年、JST社会技術研究開発センター（RISTEX）が開始した「SDGsの達成に向けた共創的研究開発プログラム（SOLVE for SDGs）」でも、国内の地域課題の解決を通してSDGs達成に資する研究開発が求められている。2020年、内閣府が、破壊的イノベーションの創出を目指し、より大胆な発想に基づく挑戦的な研究開発を推進する「ムーンショット型研究開発制度」を創設した。2050年までに達成すべき7つの目標を掲げているが、いずれの目標も都市環境やSDGsと密接な関係がある。以上のように、研究開発のプログラムや制度内にSDGsの理念を取り入れる機運が高まっており、都市環境サステナビリティに関わる諸課題を統合的に解決する研究開発が求められている。

• 都市暑熱化による健康被害、熱ストレス影響の予測及び評価

都市ヒートアイランド現象に加えて気候変動により都市暑熱化が進展しており、熱中症搬送者数が増加している。近年の日本の夏は、最高気温35度を超える猛暑が続いている。熱中症の搬送者数は毎年5万人を超えている。特に2018年は列島各地で連日の最高気温が40度を超え、「命が危険な暑さ」と警戒が呼びかけられた。熱中症搬送者数は9万5千人を超え、10万人に迫る勢いとなり、もはや「暑熱災害」の様相を呈している。2020年はCOVID-19蔓延への対策から、炎天下でのマスク着用による熱中症リスクがさらに増大した。今後も引き続き温暖化が進行することでハザードの勢いが増す一方、熱中症に対して脆弱性の高い高齢者の割合が増加することから、熱中症被害者数も当面増加の一途を辿ると警戒されている。こうした高温の常態化に備え、科学に基づく適応策を社会実装しなければならない。

特に日本の大都市はほとんどが、厳しい夏の暑さに晒される位置にあり、欧米の諸都市と比較すると明らかに高温多湿の熱中症に陥りやすい気候条件である。そのため、都市における暑さ対策について、欧米諸国から懸念が示されやすい。そのような背景のある中に、2019年9月に行われた世界陸上選手権のマラソンにおいて棄権者が続出した。開催地のカタールの首都ドーハは高温多湿で、日本の夏と同じ気候とみなされた。これを受け、2020年8月に開催予定であった東京オリンピックでのマラソンコースを東京都心から札幌に変更を決定したことが話題になった。 COVID-19の影響により東京オリンピック・パラリンピックは延期となったが、酷暑が予想される季節、時間帯での会場および会場までのアクセス空間での様々な暑さ対策に関する議論と、健康科学として合理的な対策の検討が注目された。

このような背景を受けて、全球モデルからダウンスケールして都市の暑熱環境の予測をしようとする研究と建物内の温熱環境や人体の体温変化を予測しようとする研究を結びつけようとする試み[健康2)]が開始されている。また、都市キャノピー内の暑熱環境の実態や暑熱影響を緩和するための緑陰形成の状況を把握するために、都市で撮影された動画や静止画を人工知能で分析する研究も開始されている。バイタルセンサー等を用いてパーソナルな熱中症発症リスクを予測して警告するためのデバイス開発なども進んでおり、高温化する現代、将来の都市環境下で人命を救うための研究が活発化している。

また、気候変動への関心が高まる以前より、都市ヒートアイランド現象が世界の各都市で課題であった。その中で、我が国ではクールルーフ、クールペイブメント、屋上緑化などのヒートアイランド緩和策に関する研究や実践が進められ、日除けや街路樹などによる日射遮蔽、ミスト噴霧、散水などによる暑さ対策がヒートアイランド適応策として加わってきた。最近では外部空間における人体の温熱生理、心理反応を考慮した暑熱適応に関する研究や実践に移行しつつある。日本では環境省がヒートアイランド対策で培われ、気候変動適

応策の知見も加えて「まちなかの暑さ対策ガイドライン」[健康3)] を公表している。地方自治体での熱中症対策は予防のための普及啓発、放送等での注意喚起や高齢者の訪問・声掛けといったソフト対策が主体の状況である。複合災害を見据えた避難場所の確保や公共施設の空調設備の設置、緑地を増やす、風の道をつくるといったハード対策を強化していく必要がある。適応策のメニューの充実、社会実装のための合意形成等、新たな連携と分野を横断した研究が望まれる。

海外においても、特に熱ストレスの高い都市での体系的な研究や実践の例は決して多くない状況であった。一方、最近では、熱ストレス影響のうち、死亡に関しては既に大規模な国際共同研究体制が構築されている[健康4)]。従来は個々の研究チームが少数の地域データを用いて異なったモデルで解析を行っていたため、地域ごとの差異が、機構によるものか、解析手法によるものか判然としなかった。しかし、大規模な国際共同研究体制により、多くの都市に関して同一の手法で解析され、しかも統計的なバラツキを制御可能になったことで、気候や社会経済的な要因の影響の評価が可能になった。また、将来予測もより正確に行えるようになってきている。都市生活分野との関連では、ヒートアイランド現象による熱ストレス影響に関して、量的に評価した論文が発表された[健康5)]。この論文では、ホーチミン市を細分化して、それぞれの区分における気象要因を温暖化ダウンスケーリングで推定することで、ヒートアイランドによる熱関連超過死亡の増加を量的に評価している。今後、世界各都市で同様の評価を行うことで、ヒートアイランド現象を考慮した将来予測が可能になる。

これまで地球温暖化の緩和策としてエアコンを極力我慢する風潮もみられたが、熱波も災害の一つであるという認識が広がり、エアコンの適切な使用が重要という考えの転換が進んでいる。これに関連して、東日本大震災の翌年に電力消費を抑制する必要に迫られ、東京電力管内で電力消費は減少したが、熱関連超過死亡は増加しなかったことが報告された[健康6)]。この詳細の機序は明らかではないが、熱ストレスによる死亡を増やすことなく、電力消費を削減できる可能性があることに期待を抱かせるものである。ただし、熱ストレスの影響は、死亡にとどまらない。救急搬送データなど、気温が高くなることによって起こる非死亡影響の評価もなされている。そのほか、睡眠障害などの研究も行われている。

• 都市における身近な自然環境と人の健康の関係に関する研究

現在、公衆衛生学や都市計画学や生態学等の分野で、都市における身近な自然環境と人の健康の関係に関する研究が進んでいる。これまでの研究から、身近な自然（主に都市緑地）との関わり合いは、ストレス減少、睡眠の質の向上、心理的健康の改善（鬱症状の減少、不安症状の減少、幸福度・人生満足度の向上、攻撃性の減少、ADHDの症状の減少）、社会的結合度の向上、血圧の低下、出生重量の増加、心不全の防止、幼児の発育の促進、肥満の防止、視力の向上、免疫機能の向上、糖尿病の防止、寿命の向上等の様々な健康指標と関連することが報告されている[健康7)]。これらの健康指標は大きくは、（1）身体的な運動促進（緑地の散策等）による健康効果、（2）直接的な自然との接触から得られる精神的な健康効果、（3）地域コミュニティに属する人との接触に伴う社会的健康効果、（4）自然との接触で得られる認知機能の向上の四つの効果の結果として考えられている。また、これら健康指標の全てではないものの、上記の健康状態の向上と自然体験の間のメカニズムに関する理論もいくつか開発されている。例えば、自然体験と心理的健康の改善はStress Reduction Theory（自然環境と接することで心理的ストレスが減少するという考え）やAttention Restoration Theory（自然環境と接することで精神的な疲労が軽減するという考え）によって説明でき、免疫機能の向上はOld Friends Hypothesis（直訳は旧友仮説。近代までヒトの体に刺激を与えていた微生物や寄生虫が、現代、激減したことが自己免疫疾患の増加につながっているのではないかという仮説）[健康8)] や

Biodiversity Hypothesis（直訳は生物多様性仮説。都市化進展により自然環境の微生物に接触する機会が減少したことが自己免疫疾患の増加につながっているのではないかという仮説）[健康9)] 等により理論的な説明が試みられてきた。

当該分野における初期の研究は、都市の自然がもたらす短期的な健康効果（都市緑地の滞在で得られる一時的なストレス減少等）に注目してきたが、景観や健康データの整備、統計解析の手法発展に伴い、より長期的な健康にも影響することが明らかとなってきた（例えば、鬱症状の減少等）。加えて、近年では、主に生態学者らの参入により、これまで抽象的に扱われてきた「自然」を分割し、どの種類・要素の自然が特に人の健康促進に結びついているのかを明らかにする動きが高まっている。健康促進に資する自然の要素を特定することは、今後具体的な都市景観管理を行う上で必須である。

• Co-benefit（共便益）

緩和コストを考慮する場合に重要な概念であるCo-benefitに基づく研究が最近、加速している。緩和のための化石燃料の削減は短寿命気候強制因子（Short-Lived Climate Forcers：SLCFs）の減少を意味する。SLCFsには、大気汚染で重要な粒子状物質の成分やオゾンが含まれている。緩和策をとれば、粒子状物質とオゾンの減少を通じて、健康影響の減少が期待されるが、これまでは気温の影響は気温の影響として評価し、大気汚染の評価に際しては、気温を共変量としてその影響を除いて大気汚染の影響を評価されてきていた。Co-benefitを定量的に評価するために、この二つの要因をモデル化するための研究が米国などでも始められている。また、Co-benefit研究としては、牛肉などを少なくする食生活改善による健康なども行われている。

• 極端気象による多様な影響評価

極端気象による影響についても、国際的なデータベースなどの整備により、評価が可能となってきている。しかし、地球レベルを対象とした健康分野の評価研究はほぼ死亡と経済損失に限られる。近年頻発化している洪水災害に際しても、単に死亡だけでなく、避難所における生活を強いられることの問題、家族や家などを失う精神的な問題なども非常に大きな問題だが、個別の災害についての報告にとどまっているのが現状であり深堀が必要である。

• 人口集中部への持続可能な水資源・食料・エネルギー供給

海外では、都市や地域との具体的なプロジェクトとして適応策を実装し、その情報を発信共有するトレンドがある。特に途上国では健康分野で安全な水供給と感染症に重点が置かれている。また、都市における貧困層の住居は、自然災害などに脆弱である場合が多い。日本であまり認識されていないが、都市は水資源・食料・エネルギーの一大消費地であり、その需要は周辺の地域が支えている場合が多い。今後も都市への人口集中が進む地域での、気候変動にレジリエンスで持続可能な水資源・食料・エネルギー資源供給についてのプロジェクトが増加傾向にある。

（4）注目動向

［新展開・技術トピックス］

■気候変動への適応（都市防災を含む）

• 街区・建物スケール（空間解像度1m程度）の温暖化ダウンスケーリング

ほとんどの温暖化ダウンスケーリングは空間解像度が最小でも数km程度までだが、近年、街区・建物ス

ケール（空間解像度１ｍ程度）に至る温暖化ダウンスケーリングのモデル開発[適応4),5)]が行われている。

• 気候変動の影響の予測手法の精緻化

気候変動による影響の予測は代表濃度経路シナリオ（Representative Concentration Pathways：RCPs）と共通社会経済経路シナリオ（Shared Socioeconomic Pathways：SSPs）を組み合わせて行う。その際、SSPごとの人口を用いて熱関連超過死亡数や動物媒介感染症死亡数などの死因別死亡数を計算している。しかしながら、現時点で用いられているSSPsは、それぞれのSSPにおける社会経済的状況によって死因別死亡数が異なる、という公衆衛生学では常識となっている事実を考慮していない。国立環境研究所を中心に、日本独自の社会経済的状況を考慮したシナリオSSPjが開発されており、近い将来、日本の都道府県別の将来予測に使用される。

• グリーンインフラ

米国で発案された社会資本整備の手法で、自然が有する多様な機能や仕組みを活用したインフラストラクチャーや土地利用計画を指す。我が国が抱える社会的課題を解決し、持続的な地域を創出する取組みとして、2015 年の国土形成計画の第 4 次社会資本整備重点計画に採り上げられた。環境問題や社会の変化に対応する手段の１つとして近年、国内外で注目されており、インフラ整備の在り方が抜本的に見直され始めている。グリーンインフラは、自然の機能を地域課題の解決に活用しようとするソフト・ハードを混ぜ合わせた考え方で、昨今においては自然の力を防災・減災に活用する“Ecosystem-based disaster risk reduction：Eco-DRR”という考え方が注目を集めている。

2019年7月、国土交通省はグリーンインフラ推進戦略を発表した。そして2020年3月、同省はグリーンインフラの社会実装推進を目的とした「グリーンインフラ官民連携プラットフォーム」を設立した。他にも、環境省と内閣府は2020年2月から気候変動を踏まえたインフラ整備に関する意見交換会を開催するなど、グリーンインフラの整備を重要な施策の一つに掲げ、関係府省庁の垣根を超えたパートナーシップを生かす動きが活発化している。今後、こうした動きを支援するためのグリーンインフラ整備に資する研究開発の推進が必要である。

• 都市農業[適応8)]

近年、都市環境の向上・気候変動への適応という考え方だけではなく、都市住民の健康促進の観点から都市農業が注目を浴びている。単なる地産地消だけでなく、教育機能やグリーンインフラとしての防災機能、新たな産業としての雇用創出、QOLの向上など多岐にわたるベネフィットも期待できる。実際に最近の研究から、都市における農体験は、都市住民に様々な健康便益をもたらすことが明らかになってきている[適応9)]。

生産緑地の2022年問題が間近に迫る中、COVID-19の拡大を受けて、大都市近郊農地の宅地転用が一層増えることが予想されている。無秩序、無計画な宅地開発は都市景観、住環境保全の衰退につながる。長期的に魅力をもった新しい農住まちづくりの在り方を示していくためにも、都市農業の多面的な便益、機能を明らかにしていくことは重要である。

• 雨雲レーダー（高解像度降水ナウキャスト）

気象庁や各気象情報会社などが提供する雨雲レーダー等の画面が、スマートフォンなどの携帯端末で誰でも気軽に確認できるようになった。これは、防災・減災対策のツールとして有効である。

• タイムライン[適応10)]

2012年、ニューヨーク州がハリケーン・サンディ来襲時に実施した「タイムライン」という手法は注目されている。発生が予測される被害や過去に起きたことのある事象を時系列に並べ、被害の発生を抑えるために計画を作る。これをもとに住民避難を進めたニューヨーク州では被害を最小限にすることができた。我が国での洪水災害においても、河川水位の上昇などの指標に応じた避難行動などに取り入れられ始めている。

• ハザードマップ

シミュレーションにより、豪雨時の特に都市部での浸水予測がより正確にできるようになったことから、日本では、多くの自治体がハザードマップを作成・公開するようになった。国土交通省では、洪水のほかに土砂災害、津波のハザードマップ情報も併せて提供している。先進的な自治体では、地域住民と協力し、避難経路や避難が難しい高齢者などの介助の情報なども含めたマップを作成している。近年、我が国では、2次元の平面マップを3次元化の立体情報を含んだマップにする検討や、下水管きょからの内水氾濫予測を含めた避難ルートマップなどに高度化する検討が行われている。また、熊本市では、保険会社、気象予報会社、AI技術ベンチャー等と協力して、防災のための都市デジタルツインを構築する取り組みを始めたことが発表されている。

• VRやCGの活用

災害リスクコミュニケーションツールとして、VRやCGを用いた研究が行われている。具体的には、VRを利用して過去の災害の可視化する、または予測される状況を再現する、その疑似体験などであり、災害を我が事としてリアルにとらえるために有用である。

■都市環境における感染症への防御（医学を除く都市工学、都市環境学的側面）

• 室内環境における感染リスクの予測

空調・換気による感染性エアロゾルの対策は、基本的に在室者の感染リスクを下げることである。その感染リスクを評価するために、病原体からの被曝量を評価する必要がある。現状では、感染リスクに関して様々な数理モデルが提案されている。都市スケールでは、SEIR（Susceptible：感染症の免疫を持たない者、Exposed：感染症が潜伏期間中の者、Infectious：発症者、Recovered：回復して免疫を獲得した者）モデルが用いられているが、実はこのモデルに感染のメカニズムが含まれていない。建物スケールレベルでは、区画したSEIRモデル、エージェントモデル、Wells-Rileyモデルが用いられている。この中で、感染リスクと換気量の関係を明確に表しているのはWells-Rileyモデルである。 Wells-Rileyモデルを用いた感染リスクの予測には、最小感染量（quanta）を知る必要があり、それに関する研究が多く行われている。

• 感染と換気量の関係

換気量と環境中のSARS-CoV-2の実態や集団感染が起きた時の換気量に関する調査結果が幾つか報告されている。シンガポールのCOVID-19アウトブレイクセンターに収容されている3名の患者の隔離室を対象としたウイルス活性に関する調査の結果では、排気口表面からはSARS-CoV-2が検出されたが、空中からは検出されなかったことから、十分な換気（当時12回/h）を行うことで、空気中に浮くウイルス濃度は効果的に希釈されることが示唆された[感染7), 8)]。89名の客中に感染者9名が出た広州レストランの集団感染時の換気量は2.7～3.7m^3/（h・人）と極端に少なかったこと、かつ、感染者が出たエリアは空気が循環していただけであったことが集団感染につながったと推察されている[感染9)]。

換気装置が備え付けられた建築物、集合施設等においても、設計値通りにしっかりと機能しているかが重要である。建築物の保全、運用に関して、我が国では「建築物における衛生的環境の確保に関する法律（建築物衛生法）」、「建築物環境衛生管理基準」が定められ、室内CO_2濃度は1000 ppm（0.1%）以下に維持管理に努力する義務が課されている。 SARS-CoV-2をはじめとするウイルスに関しては未解明かつ計測が困難であり、基準値を設けるのは困難だが、CO_2濃度計と既知の知見によって換気が正常に行われていることは確認可能である。屋外大気におけるCO_2濃度は全球平均で約410 ppm（0.041%）、東京都心で約450 ppm（0.045%）である。一方、人間の呼気中のCO_2濃度は安静時、運動時で変動するが、平均すると3万～4万ppm程度である。人間が密閉した屋内空間に密集している際、換気装置の正常動作の確認や、換気量については、室内CO_2濃度を計測することで簡易に把握できることが既知であり、今後このような知見の応用が進展することが期待される[感染10)]。

• 補助設備としてのポータブル式空気清浄機の活用

補助設備としての空気清浄機は局所の空気浄化に有効であることが知られている。感染リスクの低減策として、対象室容積に応じた風量で、HEPAフィルタ（High Efficiency Particulate Air Filter、高性能フィルタ）付の空気清浄機の活用が薦められている[感染11), 12), 13)]。

• UVGIの活用

ウイルスに対するUVGI（Ultraviolet Germicidal Irradiation、紫外線による照射による殺菌）の有効性から、WHO[感染14)]を始め、CDC（米国疾病予防管理センター）、REHVA（欧州空調・換気設備協会）、ASHRAE（米国暖房冷凍空調学会）などがその適応を推奨している。また、2020年4月に改訂されたWELL Building Standard®（建物利用者の健康・快適性に焦点を当てた建物・室内環境評価システム）において、COVID-19関連で空気の微生物対策の項目に紫外線による空気殺菌が追加されている[感染15)]。UVランプの設置場所によって、アップルーム方式とインダクト方式に分類されている。前者は部屋の上部、後者は空調システム内（空調機内またはダクト内）にUVランプを設置することを指している。

COVID-19に関連した機器の実装においては、たとえば、米国コロンビア大学の特許のライセンスを受けたウシオ電機株式会社の米国子会社Ushio America, Inc.が、222 nm紫外線を用いた殺菌・ウイルス不活化装置などが注目されている。2020年11月時点でSARS-CoV-2に対する不活化の効果の確認と、人の目や皮膚への障害性が少ないという報告が幾つかなされている。科学的根拠の蓄積と安全な社会実装に向けた取り組みの広がりが期待される。

• 都市計画の動的レイヤーリング[感染16)]

西欧の近代都市計画におけるゾーニングとは、空間を区分けし、個々の空間単位を均質な利用に特化させ、それらを集合化させて都市機能を満たそうという発想である。自然災害があまり発生せず、堅牢性（ロバストネス）を重視する西欧の近代型の発想と言える。ゾーニングの結果、土地利用が固定化され、相当な事態が無い限り変更しない計画の在り方が、現代社会に対応しきれなくなっていた中、さらにCOVID-19のパンデミックが発生し、抜本的な見直しが迫られている。一方、近代に西欧型都市計画を輸入する以前まで、もともと自然災害が多い日本では、都市は再建を繰り返すレジリエンス（復元力）の発想が必然的であった。そのような背景での動的レイヤーリングの発想とは、たとえば建築物においては間取りや用途変更が可能な柔軟性、都市構造においては単一機能に固定しない冗長性（リダンダンシー）が該当する。河川敷の洪水防止

機能と生態系保全と住民の余暇利用や、田んぼの食糧生産機能と暑熱緩和機能、洪水調節、地下水貯留機能といった、時間や危機発生に応じた多面的機能も動的レイヤーリングの発想である。今後、さらなる新興・再興感染症の襲来や、気候変動に伴う風水害等の激甚災害に備えるに際して、現代型さらには将来型都市計画にあたり、新しい動的レイヤーリングに関する研究や検討が注目される。

■都市環境における健康、暑熱対策等

• 熱関連超過死亡の推定

熱関連超過死亡の推定では、大きく二つの現象が明らかになりつつある。（1）リスク関数として、気温が高くても低くてもリスクが高く、その間にリスクが最低となる気温（Minimum Mortality Temperature：MMT）が存在する。このMMTが、気候の変化に応じて変化することはわかっていたが、どの程度の早さで起こるのかは不明であった。最近、その早さに関する研究が進展している。（2）MMTに比較して、一定の高温になったときのリスクも、年代とともに一定ではないことが明らかになってきている。ただし、国ごとに状況が異なり、リスクが減少している国もあれば一定の国もある。エアコンの普及率や社会経済的状況などとの関連に関する研究が報告されている[健康10)]。これら二つの現象に関する理解が深まれば、熱関連死亡の将来予測がより妥当になると期待される。

都市のヒートアイランド現象による影響について、都市の区画ごとに死亡状況と気温の推定値それぞれを用意して熱関連死亡を評価することがようやく行われるようになってきた。現在はホーチミン市のみであるが、他の都市でも同様の評価を行うプロジェクトが計画されており、今後数年で飛躍的に発展する可能性がある。これに関連して、環境省S-14プロジェクトで研究された、3次元の建物情報を考慮に入れた都市気候シミュレーションの発展が重要である。このシミュレーションは、1）都市の区画ごとの正確な気温推定に大きく寄与することから、ヒートアイランド現象の影響評価に、2）都市計画の違いによる将来の熱関連死亡数の相違を予測することに用いられることから、将来の緩和策と適応策に関わる政策決定に大きく貢献することが期待される。

• 暑熱影響の予測 / 緩和 / 適応策

熱中症発症者数は増加傾向にあり、日本だけではなくアメリカやヨーロッパなど世界でも熱中症の被害者が増加しており、各国で熱中症リスクを評価する研究が実施されてきた。近年では、アメリカのローレンス・バークレー国立研究所が「暑熱化する世の中の解決策としてのクールビルディング」[健康11)] を打ち出し、全世界の暑熱環境に関わる研究者に国際共同研究を持ちかけている。人工被覆の縮小、緑地の増加、保水機能を有する建材の採用、建物躯体の性能強化などの効果を総合的に取りまとめている。日本でも、再帰反射を用いて余分な太陽エネルギーを吸収したり、蓄熱するのを抑制したりして都市ヒートアイランド現象を緩和する再帰反射システムが開発、実用化されている。

地域や場所の気象特性を建造物や道路、樹木などの影響も考慮した上で予測し、さらに詳細な人体モデルによって個人単位の熱ストレスを定量評価する技術が開発されている。また、熱中症高リスク群である高齢者や子供に焦点を当てて年齢別に熱中症発症者数を予測する手法も開発されている。

• 都市気候における暑さ対策の導入

都市における暑さ対策としては、工事現場での空調服の採用やセンサを用いたアラートシステムの導入などの取り組みが先行している。まちなかの暑さ対策として、環境省や自治体の支援によって、イベント会場などでの広場、ベンチ、バス停などでの導入事例がある。暑さ対策技術の開発と評価、適材適所の導入に向けた

シミュレーション、都市計画への反映のための仕組みづくりなどが注力されている[健康12)]。

• ローカルSDGs

Think Globally, Act Locallyの理念に基づき、地球規模課題のSDGsを地域レベルに落とし込んで実践する「ローカルSDGs」が注目を集めている。環境省は2020年に「環境省ローカルSDGs - 地域循環共生圏づくり プラットフォーム -」を立ち上げ、地域レベルでのSDGsの実践を支援している。ローカルSDGsに関連した研究も進んでおり、「環境研究総合推進費1RF-1701：ポスト2015年開発アジェンダの地域実装に関する研究」（2017～2019年度）の研究成果である「ローカルSDGsプラットフォーム」が公開されている。これは自治体におけるSDGs取り組み状況を検索、共有することを支援するオンラインプラットフォームである。また、「環境研究総合推進費1-1801：SDGs目標達成に向けた統合的実施方法の包括的検討」（2018～2020年度）では、SDGsを政策ツール及び分析ツールと捉えこれを軸とし、多様な行為主体において、優先課題に応じた制度構築や政策推進モデルの形成を行い、SDGsの効果的推進に関する施策や行動の創出を支援するための政策指向の研究が進められている。

• SDGsスマートウェルネス住宅

我々の生活基盤である住宅性能の改善は、居住者の快適性や健康性の向上に資するほか、光熱費等の削減を通して地球環境保全にも貢献する。 WHOもこのような点に注目して、2018年11月にSDGsのゴール3（全ての人に健康と福祉を）とゴール11（住み続けられるまちづくりを）の達成に資することを目的として「WHO Housing and health guidelines（住宅と健康に関するガイドライン）」[健康13)] を公表している。昨今のCOVID-19感染拡大を受けて従来の生活様式の大きな改変が求められており、それを支えるハードとしての住宅のあり方も問われている。自宅で業務を行うテレワークも広がりを見せており、一部では生活空間としてだけではなく執務空間としての性能を併せ持つことが要求されるような状況となりつつある。こうした社会の要請に応える、SDGsスマートウェルネス住宅に関する研究が進められている。

• 用量反応モデル（dose-response model）の応用

用量反応モデルとは特定の病原体が特定の集団に引き起こす影響（感染発症、死亡等）の確率を、病原体の曝露量（用量＝摂取量）の関数としてあらわしたものである。これまでは化学物質の健康影響に関する基準値等を設定する際に用いられてきたが、近年このモデルを都市の自然と健康の関係に当てはめる研究が行われている[健康14)]。このモデルを用いることで、都市住民が健康効果を得る際に最低限必要な「自然の摂取量（nature dose）」を推定することが可能となり、応用的意義は高い。

• VR や CG の活用

都市の自然がもたらす健康効果を定量化するためのツールとして、VR や CG を用いた研究が行われている。具体的には、VR を利用して自然度が異なる都市景観を再現するために使われている。こうした研究ではあくまで短期的な健康効果（一時的なストレスの減少等）しか検証することができないが、都市の自然と健康促進の関係を実験的に評価できるため、エビデンスの構築には有用である。

• 経験の消失（extinction of experience）

近年の都市化によって人々が自然と触れる機会が減少している傾向を示す。経験の消失は、人の健康状態

の劣化だけではなく、社会の環境保全意識・行動を衰退させる恐れがあることが指摘されている[健康15)]。つまり、都市における自然再生を行い経験の消失を防ぐことが出来れば、人の健康促進と長期的な環境保全の両方が達成できる可能性がある。

• Co-benefit（共便益）

近距離の移動を車から自転車に変えることで緩和と健康増進のCo-benefitが可能であるとの報告は以前からあったが、ある地域での報告に限られていた。また、将来予測に用いるような枠組みができていなかった。最近ではSLCFs（短寿命気候強制因子）に関する理解が深まり、緩和策に応じたSLCFsの将来予測が可能となってきているため、国、あるいは全球レベルでのCo- benefitの評価を目指すプロジェクトが可能となってきている。ただし、気温と大気汚染の影響を同時に評価するモデルはまだ開発途上である。単純な仮定に基づいた将来予測は報告されたものの[健康16)]、今後の数年でさらに大きな進展が期待されている。

［注目すべき国内外のプロジェクト］

■気候変動への適応（都市防災を含む）

• 気候変動適応技術社会実装プログラム（SI-CAT）（2015 ～2019年度）

気候変動適応策の確実な社会実装に重点を置き、モデル自治体を設定して実施された。地方自治体のニーズを汲み取った気候変動適応方策の技術開発の実施と、地方自治体が策定する適応計画や企業における新ビジネス創出への貢献を目指し、様々な研究の成果などを発信した。地方自治体、地方大学や地域の研究機関との連携により、地域のステークホルダーやアクターと共に行うこのような研究プロジェクトはさらに多く実施していくべきである。本プログラムの研究成果の一環として、データ統合・解析システムDIAS（Data Integration and Analysis System）により、東北から九州までの5km空間解像度の力学的ダウンスケーリングデータ[適応11)]や、全国1km空間解像度の統計的ダウンスケーリングデータ[適応12)]（ともに将来予測のダウンスケーリングデータ）などが公開されている。

• 環境研究総合推進費S-18：気候変動影響予測・適応評価の総合的研究（2020～2024年度）

「我が国の気候変動適応の取り組みを支援する総合的な科学的情報の創出」を目的としている。農林水産業、水資源・水環境、自然災害・沿岸域、健康、産業・経済活動、国民生活・都市生活など、複数分野において影響予測手法を開発し、共通の気候条件・社会経済条件で影響予測を行うとともに適応策の検討、評価が行われる予定である。人間の生活・健康に関しては、上下水道・建築物といったインフラや土地利用、地域の産業・文化に立脚した生活、人生の質（Quality of Life：QOL）をもとに気候変動の影響や脆弱性を評価される予定である。今後の気候変動影響評価や適応計画の見直しへの貢献に加え、自治体における適応計画の立案・実施への貢献、IPCC評価報告書などへの国際貢献が期待される。

• ムーンショット型研究開発制度

「Human Well-being」（人々の幸福）が目指され、その基盤となる持続可能な3側面（環境・社会・経済）の諸課題を解決すべく、7つのムーンショット目標（長期的に達成すべき目標）が決定された（目標1～6：令和2年1月23日 総合科学技術・イノベーション会議決定、目標7：令和2年7月14日 健康・医療戦略推進本部決定）。特に、環境面においては「地球環境を回復させながら都市文明を発展させる」と掲げられており、都市環境サステナビリティの分野における重要な研究開発制度として注目を集めている。

• 気候変動適応情報プラットフォーム（A-PLAT）

国の法制度、国内外の先進事例、地方自治体の取組みなど、充実した情報を環境省が提供している。特に、環境研究総合推進費S-8「温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究」の成果であるダウンスケーリング予測結果（格子間隔1 ㎞）は地理情報システム（Geographic Information System：GIS）で公表されており、地方自治体がリスク評価や将来シナリオに基づく計画を作成する際に有用である。今後、分野別の影響予測研究の充実が望まれる。

• あまみず社会研究会

2009年の福岡県樋井川の洪水被害を契機に発足した、研究者と地域住民との流域治水研究活動グループ。雨水を活用した分散型水管理システムの構築を通じて持続可能な多世代共創社会を目指している。 JST-RISTEX「持続可能な多世代共創社会のデザイン」研究開発領域において研究課題「分散型水管理を通した、風かおり、緑かがやく、あまみず社会の構築 」（2015年～2020年）を推進した。現在の集中型水管理システムを補完する分散型のサブシステムとして、雨水を貯留し、地下へ浸透させる取り組みを流域の多世代多様なステークホルダーとともに実施した。雨水を貯め、利用する過程で人々の水管理に対する意識を育み、地域コミュニティの再構築を促した。治水などのレジリエンス向上とともに、流域内の豊かな生態系の再生にも取り組んだ。

• ISI-MIP（The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project、分野横断的な気候影響モデルの相互比較プロジェクト）

• 米国ウェルカムトラスト財団によるco-benefit研究

■都市環境における感染症への防御（医学を除く都市工学、都市環境学的側面）

• 日本医療研究開発機構（AMED）「ウイルス等感染症対策技術開発事業（実証・改良研究支援）」「既に開発・上市されている機器等（空気清浄機、UV殺菌装置、素材等）によるウイルス等感染症対策への有効性の確認を行う研究支援」

• ロンドン大学衛生熱帯医学大学院が中心のMCC（Multi-City Multi-Country）研究

■都市環境における健康、暑熱対策等

• 国立環境研究所　気候変動適応センターPJ2-1「水資源、陸域生態系、作物生産性、人間健康に関する全球気候変動影響評価及び気候シナリオの開発に関する研究」

• 国立環境研究所　気候変動適応センターPJ2-3「気候変動による日本およびアジア太平洋域の大気汚染の変化とその環境影響評価」

• 2020年東京オリンピック・パラリンピック暑さ対策に関連した様々なプロジェクト

• JST SDGsの達成に向けた共創的研究開発プログラム（Solution-Driven Co-creative R&D Program for SDGs：SOLVE for SDGs）

地域課題の解決にSDGsを活用する研究プログラムとして2019年に開始している。国内の地域における具体的な社会課題を対象として、ソリューションの創出までの研究開発が行われる。研究開発の進捗に応じて適切な支援を行うために、シナリオ創出とソリューション創出の2つのフェーズが設定されている。いずれのフェーズにおいても、目指すべき姿を描き、その姿から立ち戻って現時点から計画を立てるバックキャスティングの手法が要件とされており、既に複数のプロジェクトが採択され、SDGsの様々なゴールに貢献する研究が推進されている。

• 世界首長誓約（Global Covenant of Mayors）[適応13)]

世界首長誓約は、世界の地方自治体の首長が、持続可能なエネルギーの推進、温室効果ガスの大幅削減、適応策の推進などを誓約し、アクションプランを策定してモニタリングしながら進める取組みである。京都議定書の枠組みでは、国によるトップダウンの取組みが主流であったのに対し、パリ協定の枠組みでは、地方自治体やNGO、企業等によるボトムアップのアプローチが主流と考えられている。特に米国では、トランプ大統領がパリ協定離脱を表明した後も、地方自治体や企業によるネットワークによる取組みが推し進められている。日本では、欧州の取組みを参考に日本版「首長誓約」が2015年に始まり、2017年からは欧州委員会のプログラム（International Urban Cooperation、名古屋大学が受託）により、「世界首長誓約/日本」が立ち上がっている。

今後、脱炭素社会に転換していくためには、新たなインフラ設置または改修が必要である。並行して、適応策も地域レベルで進めていかなければならない。これらは、新たなビジネスチャンスにもなり得る。今後、世界の大きな潮流になっていくと考えられる。

（5）科学技術的課題

■気候変動への適応（都市防災を含む）

• 温暖化ダウンスケーリングと予測不確実性

将来の気候変動（温暖化）の影響に対する各種暑熱対策の導入効果の検討・評価に関しては、温暖化ダウンスケーリングを活用した都市暑熱環境予測が欠かせない。ただし、その将来予測においては、温室効果ガス排出シナリオ、土地利用・土地被覆シナリオ、エネルギー利用シナリオなど、様々な将来シナリオの導入が必要となる。不確定な将来に対して、どのような将来シナリオを導入するかにより、将来予測の結果は大なり小なりの差が生じる。これは「予測不確実性」と呼ばれ、将来予測において不可避である。温暖化ダウンスケーリングで用いる各空間スケールのシミュレーションモデルの選択も、大きな予測不確実性をもたらす要因の1つとなる。したがって、可能な限り多くの将来シナリオやシミュレーションモデルを導入した温暖化ダウンスケーリングを実施し、予測不確実性の幅を定量的に評価・把握しておくことが非常に重要となる。それを踏まえた上で、各種暑熱対策の導入効果の幅も評価・把握する必要がある。

■都市環境における感染症への防御（医学を除く都市工学、都市環境学的側面）

• 室内環境における感染リスク予測の不確実性

建物スケールのWells-Rileyモデルでは、室内の空気が完全混合な状態で、患者から発生する病原体は室内で瞬時に一様に拡散することを前提にしているため、実態の非定常状態や人の呼吸域近傍のリスクを評価

できていない。したがって、室内の気流における数値解析による検討をさらに実態に近づけた評価を進める必要がある。人の呼吸域の気流特性と感染性エアロゾルの呼吸器系への沈着特性を定量的に解析し、非完全混合・非定常状態における被曝露量、とりわけ被曝リスクを検討する必要がある。

• 感染伝播を抑制するための必要換気量の検討

これまでの研究の蓄積によって、換気量の確保と気流制御を行えば、はしかや結核などの感染症の伝播を抑制できることを示す十分なエビデンスがある。しかしながら、感染症拡散を抑制するための必要換気量をサポートする十分なエビデンスはないと報告されている[感染17)]。換気量を増やせば、室内空気中の感染性エアロゾル濃度が下がることは当然だが、感染性エアロゾルによる感染リスクを抑制するための必要最小限の換気量に関する知見の獲得が、感染症対策において重要である。感染リスクの低減に加えて、省エネの追及にもつながるため、検討する必要がある。

• ポータブル式空気清浄機の設置方法

空気清浄機は室内の空気を循環させながら空気中の浮遊粒子をろ過する仕組みとなっている。従って、フィルタろ過式空気清浄機の浄化性能はフィルタの捕集率とその風量に関係する。そのため、対象室の用途・容積に応じて空気清浄機の風量、設置台数、設置方法に関する指針の策定が必要である。REHVAでは相当換気回数2～5回/h（フィルタによって粒子が除去された後の空気を外気とみなした場合の換気回数）、厚生労働省では風量5 m^3/hの空気清浄機で床面積10 m^2以内に1台を推奨している（天井高が2.6 mの場合、相当換気回数は11.5回/h）。空気清浄機の設置場所と適応床面積の最適化に関する検討が必要である。

• UVGIの応用

紫外線による殺菌技術はほぼ確立されている。その応用として、海外ではUVGIによる殺菌が病院や教室などに広く使用されているが、国内ではその設置例が極めて少ない。紫外線ランプの消費電力は比較的少ないため、正しい方法で設置すれば、殺菌効果を発揮すると同時に、省エネも図られる。今後、我が国でもUVGIの適応に関する検討が必要である。

■都市環境における健康、暑熱対策等

• 都市ヒートアイランド対策

局所的な温暖化である都市ヒートアイランドへの対策技術は建築・都市環境工学分野などで数多くの研究実績・知見がある。緑化、高反射率建材・塗装や保水性建材・舗装などの導入効果は実証実験などを通じて多く検証されている。都市の気温上昇は地球温暖化と都市ヒートアイランドの2つの温暖化によって生じている。都市ヒートアイランドに対して蓄積された暑熱対策の役割がますます重要になる。日本は世界全体のCO_2排出量のうち3.4%の排出割合（2017年時点）だが、地球温暖化の緩和策は日本一国の努力のみでは困難である。すなわち、日本の諸都市の場合、地球温暖化に伴う都市の気温上昇（あるいはその一部）は各種の都市ヒートアイランド対策の導入によって相殺することを目指すしかない。

個々の技術としてはクールルーフ、クールペイブメント、屋上緑化などによるヒートアイランド対策、日射遮蔽、ミスト噴霧、散水などによる暑さ対策技術は開発、評価がかなり進んでいる。残された研究課題は外部空間における人体の温熱生理、心理反応を考慮した暑熱適応などである。

これまでに数多くの研究実績・知見を有する暑熱対策をさらに積極的に活用していくことが求められる。都

市ヒートアイランド現象の影響評価に関して、高度なシミュレーションが可能になっているが、計算資源をかなり多く消費する課題がある。計算機の進歩、あるいは計算方法の進歩が待たれる。

• 住宅内における熱中症リスク評価

人体モデルを用いたシミュレーションにより、暑熱環境下における体温上昇量や発汗量などの算出や熱中症発症要因の特定が行われ、熱中症リスクの評価が従前よりも精緻に行えるようになってきている。近年は、住宅内における熱中症の発症数が増加しており、屋外の熱中症発症者数と割合として変わらない程度になっていることから、その予防が急務である。住宅内の温熱環境の予測技術と人体の熱収支モデルを結び、年齢以外の個人属性を考慮した熱中症リスクのパーソナル評価が必要であると考えられる。また、推計した熱中症リスクの結果を個々人にリアルタイムでフィードバックする熱中症早期警戒情報システムの開発も求められている。

• 健康効果をもたらす自然の「種類」、「量」、「質」の特定

現在までに、身近な自然との接触は様々な健康指標の向上と関係があることが分かってきたが、まだ多くの学術的・応用的課題も存在する。例えば、これまでの研究では「自然」の中のどの要素（種類）が特に重要な健康効果をもたらすのかが分かっていない。これまで当該分野における研究の多くは「緑地」や「公園」がもたらす健康効果に注目してきたが、英国におけるいくつかの研究では、都市に生息する鳥の鳴き声が人の精神的健康を向上させる可能性が示唆されており[健康17)]、野生生物がもたらす健康効果にも近年注目が集まっている。また、どれくらいの「量」や「質」の自然があれば都市住民が十分な量の健康効果を得ることが出来るのかが不明である。最近豪州で行われた研究によれば、都市緑地から得られる健康効果は「週に30分の利用」で十分に得られることが指摘されている（それ以上利用しても健康状態の改善は見られない）[健康18)]。こうした自然の「種類」、「量」、「質」と健康の関係を調べることで得られた知見は、今後の都市計画やグリーンインフラ整備に実際に活かすために必須の情報となる。

• 健康効果における地域差・個人差の評価

これまでの研究から、身近な自然との接触は様々な健康指標の向上と関係があることが分かってきたが、実際のところ両者の関係の間には大きな地域差・個人差があると考えられる。例えば、これまでヨーロッパなどの比較的寒冷な地域で行われてきた研究では、自然との接触は様々な健康便益をもたらすが、シンガポールなどの熱帯域の都市では明瞭な健康効果が得られていない[健康19)]。また、自然体験がもたらす健康効果には個人差もあるだろう。例えば、自然に対して強い関心がある人は自然体験からより多くの精神的健康便益を得ることが報告されている[健康20)]。今後は、都市の自然がもたらす健康効果に地域差や個人差が生じる原因を特定する必要がある。

• エビデンスレベルの向上

自然との触れ合いによる健康効果を扱う本分野におけるこれまでの研究の多くは、ランダム化比較試験ではなく、比較研究や横断的研究であるため、必ずしもエビデンスレベルが高くないものも含まれる点に注意が必要である。特に、横断的研究で得られた知見は「自然体験によって健康になる」のか「健康な人が自然体験をよくする」のかの区別がつかないという批判もある。そのため、今後はランダム化比較試験等の、よりエビデンスレベルが高い手法を用いた研究が必要である。

• 客観的な健康指標の活用

これまでの自然による健康効果に関する研究の大部分は、自己申告型のアンケートに基づく手法（自己申告による鬱症状の診断等）を用いていたが、この手法は様々なバイアスを含む可能性がある。そのため、より客観的な手法に立脚した研究が求められている。例えば、毛髪に含まれるコルチゾールの量（数か月の間に蓄積されたストレスホルモン量）を用いることで、より客観的なストレスレベルを評価できる。最近では、ウェアラブル型常時測定バイタルセンサーを用いた研究も行われ始めている。

• SDGs達成に向けたビッグデータ活用基盤の整備

SDGsに関連した研究は、様々な分野で広く行われており、SDGsに関する情報はビッグデータとなりつつある。これに伴い、SDGsのゴール間の関係性を分析するネットワーク解析が必要である。また、人間では処理しきれないビッグデータの分析にAI等の活用が期待される。オープンデータやオープンソースとの連携などをはじめ、SDGs関連ビッグデータの活用基盤を充実させる必要がある。さらにSDGsの達成度を誰にでも分かりやすく伝え得る可視化手法の開発も求められている。

• 共通社会経済経路（SSP）ごとの死因別死亡率将来予測

健康影響共通の課題である。完成出来れば非常に有用であるが、どのように枠組みを考え、どのように進めるかも含め、議論が必要であるし、かなりの人的資源を投下する必要がある。

• 各種疾患データ等の不足、不備

下痢性疾患、動物媒介感染症については、低中所得国で大きな問題になるが、これらの国における発生率の正確な情報を得ることが困難であるため、正確な将来予測が困難である。世界的な取り組みで、発生率の予測精度を改善することが必要である。

熱関連超過死亡に関しては、（4）注目動向に記載した通りリスクが最低となる気温（MMT）の気候に応じた変化を評価しなくてはならない。しかし死亡データの存在する期間が長期である国は少なく、その評価は簡単ではない。

極端な気象による影響に関しては、死亡数の評価など、全球で評価出来るようになってきているが、被害者の精神的な問題、避難所生活による影響などは研究が不足している。

• Co-benefit評価

Co-benefit評価のための、SLCFs（短寿命気候強制因子）の気温と大気汚染を同時に評価するモデルの開発が必要である。これまで単に一つのモデルに二つの変数を含めて対処してきており、その妥当性の評価は今後の課題となっている。

• 蓄積された研究資産の活用

暑熱環境下の健康影響評価に関しては、被験者実験などを通じてこれまでに数多くの研究実績・知見がある。これらの知見と、温暖化ダウンスケーリングモデルを活用した都市暑熱環境の将来予測を融合すれば、将来の暑熱環境下の健康影響評価（熱中症などの健康被害の推定など）が可能となる。ただしこの場合も、温暖化ダウンスケーリングの予測不確実性の幅に伴う健康影響評価の幅を定量的に把握しておくことが必要である。

• 多岐にわたる分野での適応策に対して地域ステークホルダーの効果的な参加

地域で適応策を進める場合、様々な分野における対策が求められてくる。仮に、その優先順位を決めていく際、どのような手法をとればよいのか一律定型的な最適解が存在しない。また、地域のステークホルダーの参加をどのように得ていけば良いのかなどの課題がある。

• 脆弱性評価

地域の持つ脆弱性をどのように同定し評価していくかが課題である。地域の既存の脆弱性によって現れ得るリスクが変わるからである。ドイツのブレーメンでは、将来予測はシナリオにより変動するため、現在の脆弱性評価に基づいた適応策の導入を進めている。

• 影響分析とリスク評価

ダウンスケールにより地域の気候予測データが得られたとしても、それが、どの分野にどの程度の影響をもたらすかの影響分析とリスク評価は一部の分野でしか進められていない。これらは地域性が大きく、現象・対象ごとの解析が必要になる。研究者からの視点だけではなく、地域のステークホルダーによる「地域知」や「伝統知」も必要であり、今後の研究が期待される。

（6）その他の課題

■気候変動への適応（都市防災を含む）

• 国レベルの追加的気候変動適応策の推進、研究成果の社会実装

IPCC第4次評価報告書・第2作業部会報告書で「最も厳しい緩和努力をもってしても、今後数十年間の気候変動の更なる影響を回避することができないため、適応は、特に至近の影響への対処において不可欠」と記載された。これを受けて、世界で気候変動に対する緩和・適応の両面作戦の重要性が認識されるようになった。しかし、「適応策」の社会における位置づけは、日本よりも海外、とりわけ自然災害の被害が多い途上国で高い。

各国において、ゲリラ豪雨や台風による洪水災害、熱波、森林火災などの極端気象、感染症の発症拡大などで、住民への具体的な被害や社会的・経済的な損害がきっかけとなり、一般的な認識が深まり、適応策の研究や対策を進めざるを得ない状況になってきている。原因解明と防止対策のための研究の重要性が認められつつある中で、科学的には予見されていた事象であっても、社会的に認識されていない、法制度に反映されていないなどの乖離が課題である。

国における法整備として、日本では2015年11月に気候変動の影響への適応計画が閣議決定され、2018年6月に気候変動適応法が成立した。オランダが2007年、イギリスが2008年、アメリカやEUが2009年に適応に関する法や戦略を策定していたことと比較して、後れをとった。

日本では歴史的にも自然災害を多く経験しており、防災対策としての「適応策」は研究、社会実装の両面に蓄積がある。しかしながら、気候変動の進行により、これまで想定されていた基準値を超える極端気象の発生頻度が高まっている。さらに災害記録や対策を積極的に継承してきていない人的要素の被害も現れている。気候変動の新たなフェーズに対処すべく、「追加的適応策」のためには、学際的な研究が必要不可欠である。研究成果がまとめられ、社会へ発信されても、社会実装を行う部分で科学に基づく政策につながり、実践されなければ、結果として、長期的視点の弱い対症療法的な状態で終止することとなる。

• 多分野連携、実務者やコミュニケータまで含めた連携、国際、ステークホルダー連携

都市生活や住民の健康への影響評価を行う上で都市暑熱環境の予測する温暖化ダウンスケーリングのモデル開発・応用研究には、気候・気候学、地理学を専門とする理学系の研究者、建築・都市環境工学、土木工学を専門とする工学系の研究者の協働が必要である。膨大な計算量の対処には、計算科学を専門とする研究者と協働し、計算高速化・効率化の取り組みも必要である。都市生活や住民の健康に対する気候変動影響評価に関しては、さらに工学系の実務者とも協働して取り組む必要がある。その評価を踏まえた具体的な適応策の検討には、社会科学系や人文学系の研究者・実務者との協働も必要となる。適応方策の社会実装を行う際には、地方自治体との官学連携が不可欠であり、新しいビジネスモデルが創出可能な場合には、産との連携も必要である。学際的研究や関係ステークホルダーとのコミュニケーションを行うファシリテーターなどのスキルを持った人材が不足しており、真の分野連携が進まない。関係ステークホルダーとの連携が不足している。研究者の国際ネットワークへの積極的な参加が望まれる。境界領域であり、研究費の獲得が難しく、社会実装の分野の研究が遅れている。

■都市環境における感染症への防御（医学を除く都市工学、都市環境学的側面）

• COVID-19などの感染症と自然災害などとの複合災害への備え

2020年に我が国の熊本県では、COVID-19の脅威に晒された状況下で、さらに台風による洪水災害も襲うという複合災害が発生した。洪水避難場所の密集を避ける観点などこれまでの防災対策、感染症対策それぞれでの検討では十分に考えてこられなかった。また、我が国では2020年の夏に、熱中症とCOVID-19の識別が困難といった課題も生じた。このような複合災害に対する対策は、実際に起こるものとしてとらえ、定常時において余力がある期間から、十分に検討しておく必要性を強く示している。

• 集団感染が発生した建築・空調環境に関する専門家への情報公開

研究開発の推進や成果の社会実装を進めるにあたって、情報公開が十分でない、情報へのアクセス性が低いことが障壁となっている。日本国内における初期のCOVID-19の拡大の特徴の一つとして集団感染による拡大様式が注目された。2020年6月11日の参院予算委員会において、医療機関でのCOVID-19集団感染が6月10日時点で102件発生し、医師や看護師の感染が5月29日時点で約550人の報告があったことを厚生労働大臣が述べている。2020年7月時点、国レベルでは、クラスター班が多くの調査を鋭意行っているが、その集団感染の発生した環境に関する情報が、空調・換気を専門とする研究者が情報を入手できない課題があった。疫学調査や機微な個人情報への配慮は当然重要だが、集団感染が起きた建物、設備における空調・換気運用状況の情報をその専門家が取得できれば、それを環境・設備の視点から解析できる。これは今後の設計・運用における集団感染対策の策定に対しても極めて重要である。また、集団感染が起きた病院（建物）における空調・換気の運転情報はBEMS（ビルエネルギーマネジメントシステム）データを活用することも有効である。

• 医学・工学連携

医学による病理的な解明、疫学調査による感染拡大や収束の解析、工学による感染経路の解明はそれぞれ重要である。しかし、感染拡大初期から2020年8月時点まで、それらの分野間の連携が社会期待に比べてほとんど行われていない状況だと言える。また、集団感染に関する様々な情報、例えば、発生時の感染者の位置情報や空調・換気運転情報などを一元化したビッグデータを、医学、公衆衛生学、工学のそれぞれの視

点から解析することは、現在だけでなく将来の感染症を予防するための具体的な提案の策定において重要である。

■都市環境における健康、暑熱対策等

• 暑熱と風水害などとの複合災害の発生確率の増加

これまでに可能性は論じられていたが、実際の対応は取られていなかった重要な問題に、複合災害の問題がある。たとえば、ニューヨーク市において、大規模停電が発生した際に熱波が襲い、そのことによる超過死亡発生が報告された[健康21)]。その停電の原因は気候変動と無関係であったが、2019年にわが国の千葉県で台風19号による大規模停電が発生し、直後の熱波によって、大規模停電が発生しなかった東京都と比べて遙かに多くの熱中症救急搬送が報告された。我が国のみを観察しても、毎年のように洪水や台風による大規模な被害が発生する昨今、個別の適応策のみでは不十分で、このような複合災害を前提とした適応策に関する総合的な取り組みが必要である。それは行政対応にとどまらず、停電した場合にどのような熱中症予防策がとれるのかといった実際的な温熱生理学を含む研究の蓄積が求められる。

• 都市環境が住民の健康に及ぼす影響のエビデンスの不足

医学・公衆衛生学における研究成果の社会実装・浸透には高い信頼度が求められる。その信頼度の指標として医学・公衆衛生学分野ではエビデンスレベルが使用されている。エビデンスレベルは臨床試験や疫学研究による医学的根拠の高さによりⅠ～Ⅵの計6段階に分類されている。しかし、都市環境が住民の健康に及ぼす影響に関する研究の多くはケースレポートレベルにとどまっており、メタアナリシスやシステマティックレビュー、RCT（ランダム化比較試験）、コホート研究、ケースコントロール研究の実施例は多くない。今後、都市環境が住民の健康に及ぼす影響を明確化させるためにも、エビデンスレベルの高い研究手法の採用が求められている。

• 多分野連携の遅れ

都市の自然がもたらす健康効果を理解し社会実装するためには、公衆衛生学・疫学を専門とする医学系の研究者、建築・都市環境工学、土木工学を専門とする工学系の研究者、人間の心理・行動を専門とする環境心理学の研究者、そして生物多様性や景観を専門とする生態学系の研究者を交えた幅広い学術分野の協働が必要である。また、自然体験と健康の関係性の因果関係を明らかにするためには、高度な統計学を専門とする研究者との協働も必要である。加えて、学術的知見を基に都市緑地やグリーンインフラの管理を行うためには、工学系の実務者とも協働して取り組む必要もある。このように当該テーマの研究を行うには極めて広い学際的研究や関係ステークホルダーとの連携が必要となるが、学術分野の垣根を超えた連携はそれほど進んでいないのが実情である。

• 社会実装の機会の拡大

社会実装においては、自治体単位での都市ヒートアイランド対策と気候変動適応の両面を踏まえた、都市計画へ反映のための仕組みづくりが課題である。産官学が連携した取り組みとして、例えば、大阪ヒートアイランド対策コンソーシアムは10年以上の活動実績を有しているが、ヒートアイランド対策では民間へのインセンティブが働きにくく、社会実装の十分な後押しにはなっていない課題がある。今後は、暑さ対策技術の導入に関して、オリンピック会場、万博会場などとともに、自治体が主導する再開発プロジェクトや駅前広場整備

の支援などによる社会実装の機会拡大が期待される。

• 疾病発症率や健康情報などのデータ整備、アクセス性

低中所得国での感染症疾病発生率のデータが質的にも量的にも不十分である。この解決に近道はなく、国際開発における健康増進の優先度を上げ、低中所得国の公衆衛生インフラストラクチャーを構築することで低中所得国にも利益となり、その結果として良質のデータも収集可能となる。我が国を含む先進国においても、健康情報は一元管理されているわけではなく、実際の研究を行う場合には研究者が様々な規制をクリアして情報をリンクする必要がある。このために研究者の作業時間、研究費ともに大きな負担になっている。個人情報の保護の観点から難しい点もあるが、一元的な健康情報の蓄積は、気候変動の影響にとどまらず、人間を対象にしたほとんどの医学研究、さらには都市環境学全体にとって有益である。

（7）国際比較

■気候変動への適応（都市防災を含む）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	●温暖化ダウンスケーリングなど世界的に特徴のある研究が行われている。
	応用研究・開発	○	→	●気候変動適応やヒートアイランドの研究成果の蓄積がある。それらを長期的な災害対策に反映する必要がある。 ●個別に先進的な研究がなされてきているが、法整備が欧州と比べ遅れ、社会実装も遅れが見られている。地方自治体への社会実装などを加速するため国主導でモデル自治体でのプロジェクトが進められたが、終了している。一過性ではなく、広く波及するにはまだ乖離がある。乖離を具体的に埋めていく人材や検討が足りていない。
米国	基礎研究	○	↗	●US Cities Sustainable Development Reportが継続して発表されるなど、ローカルSDGsに関する研究が他地域と比較して進展している。
	応用研究・開発	○	↗	●米国環境保護庁（EPA）、米国国立科学財団（NSF）、Wellcome Trustなどにより適応策に関する研究支援が行われている。 ●タイムラインやグリーンインフラなどの手法を創出し、その概念も根付いており、一定のポテンシャルがある。
欧州	基礎研究	◎	↗	●伝統的に世界をリードしている。多くのプロジェクトが実施され、最新の知見を世界に発信し続けている。
	応用研究・開発	◎	↗	●応用面でも伝統的に世界をリードし、最新の知見を世界に発信し続けている。 Horizon 2020に代表されるEU全体の枠組みに加え、英国、ドイツ、フランスといった国の単位においても応用研究が実施されている。地域単位の適応策に関する政策にも影響を与える研究がなされている。 ●特に英国の一部の都市では、健康促進のためにグリーンインフラを活用する取り組みも実施されている。 ●革新的研究開発を促進するHorizon 2020プログラムの支援を受け、各国で気候変動の影響予測や適応策に関する研究を行う仕組みが確立されている。現在、Horizon 2020の後継となるHorizon Europeの枠組みが検討されているが、本分野を継続、発展するものとみられる。 ●気候変動適応に関してEU気候変動適応戦略の策定や適応策に関するオンラインプラットフォームであるClimate ADAPTを早期に開発し、本分野を世界的にリードしている。

中国	基礎研究	○	↗	●2016年に国連ハイレベル政治フォーラムの場で世界に先駆けて自発的国家レビューを実施し、SDGsへの取り組みをアピールしている。9つのキーエリアの中には都市と地方の調和の取れた開発が謳われ、基礎研究が開始されている。
	応用研究・開発	○	↗	●キャッチアップ型で、強化が図られている様子である。しかし、大気汚染や水質汚染などの中国内で関心の高い分野と比べて、目立った応用研究の報告などが見えていない。 ●「国家イノベーション駆動発展戦略綱要（2016～2030年）」を掲げ、国家的に研究を推進し総合的な国力の向上を目指している。データ駆動型＆エビデンスベースのSDGs Local Monitoringが開始されており、都市環境サステナビリティの分野でも存在感が年々増している
韓国	基礎研究	○	↗	●極端気象による災害の増加に伴い、気候変動への適応を強化するために適応フォーラムや適応技術専門家会合等を開催し、気候変動適応策に関する新たな技術を共有している。
	応用研究・開発	○	↗	●キャッチアップ型であり、強化が図られている様子だが、まだ報告数は少なく、世界的にインパクトのある研究成果は見えていない。 ●サステナビリティを目指す自治体連合ICLEIのアジア拠点をソウルに誘致し、都市環境サステナビリティに関する研究を積極的に進めている。2019年には政府や研究機関の支援の下で韓国の自治体はローカルSDGsの策定とその進捗状況を計測する指標の策定を進めている。

■都市環境における感染症への防御（医学を除く都市工学、都市環境学的側面）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	△	↗	●空調・調和関連技術に関して既往研究のレビューが行われているが、全体的にオリジナリティの高い研究成果は見えていない。
	応用研究・開発	○	↗	●空調・調和関連技術に関してSHASEなどから積極的に提言を発信し、適時アップデートを行っている。
米国	基礎研究	○	↗	●空調・調和関連技術に関してASHARE、CDC、JAMA、NIOSHなどから最新の知見を世界に発信し続けている。
	応用研究・開発	◎	↗	●空調・調和関連技術に関してASHRAEから意見書などを発信し、適時にアップデートを行っている。
欧州	基礎研究	○	↗	●空調・調和関連技術に関してREHVA、ECDCなど最新の知見を世界に発信を続けている。
	応用研究・開発	○	↗	●空調・調和関連技術に関してREHVAからガイドラインを発信し、適時アップデートを行っている。
中国	基礎研究	◎	↗	●空調・調和関連技術に関してmedRxivの投稿が急増し、その一部が既に著名ジャーナルに採択され、掲載されている。
	応用研究・開発	△	-	●空調・調和関連技術に関してまだ目立った応用研究の報告などは見えていない。
韓国	基礎研究	-	-	●最新の研究動向が不明瞭であるため評価を避ける。
	応用研究・開発	-	-	●最新の研究動向が不明瞭であるため評価を避ける。

■都市環境における健康、暑熱対策等

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	●2018年の熱波が人為起源の気候変動に帰することを示すなど、大きな貢献を示している。 ●我が国では古くから「森林浴」に関して世界的にも高水準の研究が行われている。 ●ローカルSDGsに関する研究は、年々その数と種類が増加しており、世界的にもユニークで高水準の研究が行われている。
	応用研究・開発	○	→	●国際的な枠組みの中で、日本在住の研究者も一定の貢献を果たしている。 ●個別に先進的な研究がなされてきているが、社会実装の遅れが見られる。 ●地方自治体への暑熱適応策の社会実装などを加速するため、SI-CATやS-18などの国の大型研究プロジェクトによって、強化が図られている。 ●ヒートアイランド対策（緩和策、適応策）両面の技術は建築環境総合評価システムCASBEE-HIに反映されている。環境省環境技術実証事業における実証、大阪ヒートアイランド対策技術コンソーシアムにおける認証、日本ヒートアイランド対策協議会における認証、の制度が運用されている。認証の際に参照される日射反射率の測定方法などは、JISや他の団体の規格として制定されている。
米国	基礎研究	◎	↗	●近年、米国スタンフォード大学のGretchen Daily博士らを筆頭に影響力の大きな最新の知見も世界に発信しており、基礎研究は大きく進展している。
	応用研究・開発	○	→	●ローレンス・バークレー国立研究所のヒートアイランドグループが暑熱環境に関わる研究を精力的に展開している。また、国際的なワークショップを主催し、各国の研究動向・知見を共有するなど、同分野を牽引している。 ●クールルーフ（高反射率材料）技術はCool Roof Rating Councilにおいて認証され、自治体の省エネルギープログラムなどに採用されている[健康22)]。認証の際に参照される測定方法などは、ASTMや他の団体の規格として制定されている。
欧州	基礎研究	◎	↗	●本分野を基礎、応用ともに伝統的に世界をリードしており、影響力の大きな最新の知見も世界に発信し続けている。また、多くの国際プロジェクトが実施されてきている。2017年にはドイツのボンにおいて「Biodiversity and Health in the Face of Climate Change」という非常に大きな会議が開かれる等、当該テーマに関する議論が盛んになされている。 ●クールルーフ（高反射率材料）技術はEuropean Cool Roofs Councilにおいて認証されている[健康23)]。 ●欧州連合の統計局EurostatがEU加盟国のSDGs達成に向けた進捗状況を可視化するシステムを整備している。 ISO TC268 - Sustainable cities and communities -でもSDGsを生かしたまちづくりに関する議論を欧州各国がリードする状況となっている。 ●英国は、SDGs内の各ゴールの相互作用を定量化する研究などを進めており、注目が集まっている。また、ロンドン大学衛生熱帯医学大学院が中心となってMulti-City Multi-Country（MCC）研究[健康4)]を進めている。 ●ドイツのポツダム気候影響研究所が本分野に大きく貢献している。

	応用研究・開発	◎	↗	●本分野では基礎、応用ともに伝統的に世界をリードしており、最新の知見も世界に発信し続けている。特に英国の一部の都市では、健康促進のためにグリーンインフラを活用する取り組みも実施されている。 ●Green prescriptionやNature dose等の用語が提唱されるなど、一般社会に対する普及も積極的に行っている。 ●European Cities SDG Indexを公表してEU各国の各都市の状況を可視化するなど、新しい試みが始まっている。 ●国際的な枠組みでの研究をリードしている。
中国	基礎研究	○	↗	●潤沢な資金により、論文数は増大している。独創的な研究は多くない。
	応用研究・開発	○	↗	●潤沢な資金により、論文数は増大している。独創的な研究は多くない。
韓国	基礎研究	○	-	●水準の高い研究者が、国際研究の枠組みで一定の貢献を果たしている。
	応用研究・開発	○	-	●水準の高い研究者が、国際研究の枠組みで一定の貢献を果たしている。
その他	基礎研究	○	↗	●シンガポールはアーバンヒートアイランド（UHI）の影響により年々気温が上昇している。居住者の屋外における熱的快適性（OTC）を高め、経済的にも、健康的にも大きな発展をもたらすことを目的として、都市の冷却効果の評価・測定や、意思決定支援システムの開発、気候適応ガイドラインの設計を行う「COOLING SINGAPORE」プロジェクトを発表している。
	応用研究・開発	○	-	●シンガポールは、暑熱対策に関してSingapore Green Building Councilにおいて幾つかの技術が認証されている[健康24)]。 ●インドは2019年12月に第5回ヒートアイランド対策国際会議を開催し、クールルーフに関する実践的研究をアピールしている。

（註1）フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

（註2）現状　※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている　　○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない　　×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド　※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・地域熱供給（地域冷暖房）（環境・エネ分野　2.1.13）
・エネルギーシステム評価（環境・エネ分野　2.1.14）
・気候変動観測（環境・エネ分野　2.2.1）
・気候変動予測（環境・エネ分野　2.2.2）
・水循環（水資源・水防災）（環境・エネ分野　2.2.3）
・社会-生態システムの評価・予測（環境・エネ分野　2.2.9）
・循環利用とライフサイクル評価（環境・エネ分野　2.2.10）
・農林水産業における気候変動適応・緩和（環境・エネ分野　2.2.12）
・デジタル変革（システム・情報分野　2.3.1）
・社会システムアーキテクチャー（システム・情報分野　2.3.3）
・メカニズムデザイン（システム・情報分野　2.3.4）
・トラスト（システム・情報分野　2.4.4）
・感染症（抗菌薬・抗ウイルス薬・ワクチン等）（ライフ・臨床医学分野　2.1.3）

参考・引用文献

■気候変動への適応（都市防災を含む）
適応 1）向井人史 他,「ココが知りたい地球温暖化 気候変動適応編」『気候変動適応情報プラットフォーム』, https://adaptation-platform.nies.go.jp/climate_change_adapt/qa/index.html（2020年11月アクセス）
適応 2）三村信男,『気候変動適応策のデザイン』太田俊二, 武若聡, 亀井雅敏 編（東京：共立出版, 2015）
適応 3）稲津將, 佐藤有徳,「大は小を兼ねるのか：ダウンスケーリング」『天気』57巻4号（2010）：195-199
適応 4）文部科学省気候変動適応研究推進プログラム（RECCA）,「フィードバックパラメタリゼーションを用いた詳細なダウンスケールモデルの開発と都市暑熱環境・集中豪雨適応策への応用」, https://www.restec.or.jp/recca/staticpages/index/iizuka.html（2020年11月アクセス）
適応 5）文部科学省気候変動適応研究推進プログラム（RECCA）,「都市・臨海・港湾域の統合グリーンイノベーション」, https://www.restec.or.jp/recca/staticpages/index/takahashi.html（2020年11月アクセス）
適応 6）日下博幸 他,「複数のCMIP3-GCMからの力学的ダウンスケール実験と問題比較型影響評価手法による健康影響評価：2070年代8月を対象とした東京・名古屋・大阪における熱中症および睡眠困難の将来予測」『日本建築学会環境系論文集』78巻693号（2013）：873-881, doi：10.3130/aije.78.873
適応 7）S. Iizuka et al., “Environmental impact assessment of introducing compact city models by downscaling simulations”, *Sustainable Cities and Society* 63（2020）：102424, doi：10.1016/j.scs.2020.102424
適応 8）日本学術会議農業委員会農業生産環境工学分科会,「報告持続可能な都市農業の実現に向けて」, http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-h170719.pdf（2020年11月アクセス）

適応 9）M. Soga et al., “Health Benefits of Urban Allotment Gardening：Improved Physical and Psychological Well-Being and Social Integration”, *International Journal of Environmental Research and Public Health* 14, no. 1（2017）：71, doi：10.3390/ijerph14010071
適応10）国土交通省,「タイムライン」, https://www.mlit.go.jp/river/bousai/timeline/（2020年11月アクセス）
適応11）データ統合・解析システムDIAS：大気近未来予測力学的ダウンスケーリングデータ（東北から九州）by SI-CAT, http://search.diasjp.net/ja/dataset/SICAT_DDS_5kmTK（2020年11月アクセス）
適応12）データ統合・解析システムDIAS：農研機構地域気候シナリオ2017, http://search.diasjp.net/ja/dataset/SICAT_SDS_1kmJP_NARO2017_V2_7r,（2021年11月アクセス）
適応13）Covenant of Mayors for Climate & Energy, “Latest News”, Covenant of Mayors Office, https://www.covenantofmayors.eu/en/（2020年11月アクセス）

■都市環境における感染症への防御（医学を除く都市工学、都市環境学的側面）

感染 1）河岡義裕,『猛威をふるう「ウイルス・感染症」にどう立ち向かうのか』今井正樹 監修（東京：ミネルヴァ書房, 2018）
感染 2）Center for Infectious Disease Research and Policy（CIDRAP）, ”CDC estimate of global H1N1 pandemic deaths：284,000”, CIDRAP, https://www.cidrap.umn.edu/news-perspective/2012/06/cdc-estimate-global-h1n1-pandemic-deaths-284000（2020年11月アクセス）
感染 3）竹脇出,「種々のリスクに対して社会のレジリエンスを高めるための多様な視点」『建築学会』, https://www.aij.or.jp/jpn/databox/2020/2007-hyoshi2.pdf（2020年11月アクセス）
感染 4）S. Hales et al., “Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s”, World Health Organization, http://apps.who.int/iris/handle/10665/134014（2021年1月アクセス）
感染 5）World Health Organization（WHO）, “Transmission of SARS-CoV-2：implications for infection prevention precautions”, https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/transmission-of-sars-cov-2-implications-for-infection-prevention-precautions（2021年1月アクセス）
感染 6）横張真, 山崎嵩拓,「With/Post Corona時代の新しい都市地域計画　ベッドタウンの再生によるインクルーシブ社会の実現」『都市計画』346号（2020）：108-109
感染 7）S. W. Xiang et al., “Air, Surface Environmental, and Personal Protective Equipment Contamination by Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2（SARS-CoV-2）From a Symptomatic Patient”, *JAMA Research Letter* 323, no. 16（2020）：1610-1612, doi：10.1001/jama.2020.3227
感染 8）倉渕隆 他,「新型コロナウイルス感染対策としての空調設備を中心とした設備の運用について（改訂二版）」『公益社団法人空気調和・衛生工学会』, http://www.shasej.org/recommendation/covid-19/2020.09.07%20covid19%20kaitei.pdf（2020年11月アクセス）

感染 9）Y. Li et al., “Evidence for probable aerosol transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant”, medRxiv, doi: 10.1101/2020.04.16.20067728（2021年1月アクセス）
感染10）田島昌樹,「建築の空気」『空衛』2011年7月号：65-71,
感染11）厚生労働省,「熱中症予防に留意した「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気の方法」, https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000640920.pdf（2020年11月アクセス）
感染12）RHEVA, “REHVA COVID-19 guidance document, August 3, 2020”, RHEVA, https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_V3_03082020.pdf（2020年11月アクセス）
感染13）ASHRAE, “ASHRAE Position Document on Infectious Aerosols”, ASHRAE, https://www.ashrae.org/file%20library/about/position%20documents/pd_infectiousaerosols_2020.pdf（2020年11月アクセス）
感染14）J. Atkinson et al., *Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings*（Geneva：World Health Organization, 2009）, https://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44167/1/9789241547857_eng.pdf（2020年11月アクセス）
感染15）International WELL Building Institute, 2020 International WELL Building Institute pbc., “Strategies rom the WELL Building Standard to Support in the Fight Against COVID-19”, https://resources.wellcertified.com/tools/strategies-from-the-well-building-standard-to-support-in-the-fight-against-covid-19/（2020年1月アクセス）
感染16）横張真,「ヒトに引く線・土地に引く線 - 都市計画をめぐるレイヤーリングの可能性 -」『社団法人日本都市計画学会』, https://www.cpij.or.jp/com/50+100/docs/3rd03yokohari.pdf（2020年11月アクセス）
感染17）Yuguo Li et al., “Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment - A multidisciplinary systematic review”, *Indoor Air* 17, no. 1（2007）：2–18, doi：10.1111/j.1600-0668.2006.00445.x

■都市環境における健康、暑熱対策等

健康 1）United Nations, *2018 Revision of World Urbanization Prospects*（New York：United Nations Publications, 2018）, https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html（2020年11月アクセス）
健康 2）科学技術振興機構 他,「都市空間での詳細な熱中症リスク評価技術の開発に成功～より安心・安全な行動選択に向けて～」, https://www.jst.go.jp/pr/announce/20190723-2/index.html（2020年11月アクセス）
健康 3）環境省「まちなかの暑さ対策ガイドライン改訂版」, https://www.wbgt.env.go.jp/pdf/city_gline/city_guideline_full.pdf（2020年11月アクセス）
健康 4）MCC Collaborative Research Network, “Home”, MCC Collaborative Research Network, http://mccstudy.lshtm.ac.uk/（2020年11月アクセス）
健康 5）T. N. Dang et al., “Green Space and Deaths Attributable to the Urban Heat Island Effect in Ho Chi Minh City”, *American Journal of Public Health* 108, no. S2（2018）：S137-S143, doi：10.2105/AJPH.2017.304123

健康 6）Y. Kim et al., ”Heat-Related Mortality in Japan after the 2011 Fukushima Disaster：An Analysis of Potential Influence of Reduced Electricity Consumption”, *Environmental Health Perspectives* 125, no. 7（2017）：077005, doi：10.1289/EHP493
健康 7）T. Hartig et al., “Nature and Health”, Annual Review of Public Health 35（2014）：207-228, doi：10.1146/annurev-publhealth-032013-182443
健康 8）Rook, Graham A.W. et al., “Innate immune responses to mycobacteria and the downregulation of atopic responses”, *Current Opinion in Allergy and Clinical Immunology*, vol. 3（2003）：337–342, doi：10.1097/00130832-200310000-00003
健康 9）Leena von Hertzen et al., “Natural immunity：Biodiversity loss and inflammatory diseases are two global megatrends that might be related”, *EMBO Reports*, 12（2011）：1089–1093, https://doi.org/10.1038/embor.2011.195
健康10）F. Sera et al., “How urban characteristics affect vulnerability to heat and cold：a multi-country analysis”, *Int. J. Epidemiol*. 48, no. 4（2019）：1101-1112, doi：10.1093/ije/dyz008
健康11）Heat Island Group at Lawrence Berkeley National Laboratory “Home”, HEAT ISLAND GROUP：BERKELY LAB, https://heatisland.lbl.gov/（2020年8月アクセス）
健康12）H. Takebayashi and M. Moriyama, Adaptation Measures for Urban Heat Islands 1st edition,（Cambridge, MA：Academic Press, 2020）
健康13）World Health Organization（WHO）, “WHO HOUSING AND HEALTH GUIDELINES”, https://www.who.int/publications/i/item/9789241550376（2021年1月アクセス）
健康14）D. F. Shanahan et al., “The Health Benefits of Urban Nature：How Much Do We Need?”, *BioScience* 65, no. 5（2015）：476-485. doi：10.1093/biosci/biv032
健康15）M. Soga and K. J. Gaston, “Extinction of experience：the loss of human–nature interactions”, *Frontiers in Ecology and the Environment* 14, no. 2（2016）：94-101, doi：10.1002/fee.1225
健康16）S. E. Kim et al., “Air quality co-benefits from climate mitigation for human health in South Korea”, *Environ Int*. 136（2020）：105507, doi：10.1016/j.envint.2020.105507
健康17）D. T. C. Cox et al., “Doses of Neighborhood Nature：The Benefits for Mental Health of Living with Nature”, *BioScience* 67, no. 2（2017）：147-155, https://doi.org/10.1093/biosci/biw173
健康18）D. F. Shanahan et al., “Health Benefits from Nature Experiences Depend on Dose”, *Scientific Reports* 6（2016）：28551, doi：10.1038/srep28551
健康19）L. E. Saw, F. K. S. Lim and L. R. Carrasco et al., “The Relationship between Natural Park Usage and Happiness Does Not Hold in a Tropical City-State”, *PLoS ONE* 10, no. 7（2015）：e0133781, doi：10.1371/journal.pone.0133781
健康20）C. C. Chang et al., “Life satisfaction linked to the diversity of nature experiences and nature views from the window”, *Landscape and Urban Planning* 202（2020）：103874, doi：10.1016/j.landurbplan.2020.103874
健康21）G. B. Andersen and M. L. Bell, “Lights out：Impact of the August 2003 power outage on

mortality in New York, NY", *Epidemiology* 23, no. 2（2012）：189–193, doi：10.1097/EDE.0b013e318245c61c
健康22）Cool Roof Rating Council（CRRC）, "About the product rating program", CRRC, https://coolroofs.org/product-rating/overview（2020年7月アクセス）
健康23）European Cool Roofs Council（ECRC）, "About Program Rating Programme", ECRC, https://coolroofcouncil.eu/rating-programme/（2020年7月アクセス）
健康24）Singapore Green Building Council（SGBC）, "SGBC Green Certification", SGBC, https://www.sgbc.sg/sgbc-certifications（2020年7月アクセス）