

2.8.3 都市環境サステナビリティ

(1) 研究開発領域の定義

都市住民が生活する都市環境のサステナビリティ、レジリエンスに関する研究開発、社会実装の取組を扱う。気候変動や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、実装促進策などを扱う。都市住民の健康、人生の質 (Quality of life: 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も対象とする。

気候変動と都市ヒートアイランド現象による暑熱、地震などの自然災害、それらの複合災害が及ぼす影響の解析や、地域住民協働に向けた視覚化手法などの適応、レジリエンスに資する開発や取り組みを含める。暑熱や極端気象に備えるための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。都市近郊林や緑地、里地里山、街路樹、屋上緑化等の都市の自然が都市住民の身体・精神・社会的健康に与える影響を解析する手法の開発、およびその影響の評価と予測も行う。それらを基盤とした持続的な都市景観やグリーンインフラの管理・設計も対象とする。

(2) キーワード

レジリエンス、予測不確実性、自然災害、複合災害、適応策、復旧・復興、ダウンタイム、事業継続計画 (Business Continuity Plan: BCP)、グリーンインフラ、都市緑地、土地利用規制、温暖化ダウンスケーリング、都市ヒートアイランド、持続可能な開発目標 (Sustainable Development Goals: SDGs)、地方自治体、健康、熱関連超過死亡、暑熱適応、自然体験、環境心理学、低栄養、下痢性疾患、動物媒介感染症、Co-benefit (共便益)、ライフスタイル転換、超高齢社会

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

自然災害について、気候変動が全世界的に防災対策における大きなテーマとなってきたが、地震・火山災害も社会に重大な影響を与える。我が国を含む環太平洋地域、地中海からインドにかけての地域などでは避けられない災害である。自然災害への防災は、既存の防災策に追加的な適応策をあわせたものとせざるを得ない。個別、単体での技術開発や備えはかなり進められているが、システムとしての社会実装に課題がある。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など複合災害への対策の必要性もこの数年で社会的に認識された。特に都市域での被災は、世界の経済活動にも大きな影響を与えることから事業継続計画 (BCP) の観点での対策が求められている。研究と行政的対応を継続し、レジリエンスを高めていく必要がある。

気候変動について、温室効果ガス (Green House Gases: GHGs) の大気中平均存在寿命は長期に渡り、温暖化が不可避の状況下に既にある。ますます深刻化する将来に向け、エネルギー高効率化、エネルギー転換等により気候変動影響を「緩和」する努力と、気候変動影響を前提に「適応」する両輪の対策が不可欠であることが我が国でも共通認識になりつつある。現在のように気候変動影響が顕在化する以前から気候変動影響評価が行われてきた。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、モデルを用いてリスク評価する手法である。「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¹⁾。

都市気候では、全球的な気候変動による影響だけでなく、都市ヒートアイランド現象が気候変動による暑熱が顕在化する以前からの課題である。現在は都市ヒートアイランド現象だけではなく、気候変動がもたらす暑熱も加わっている。都市ヒートアイランド現象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、すでに普及している。都市ヒートアイランド現象適応策として日射遮蔽、ミスト噴霧なども実践されている。このような対策技術を適材適所に導入する社会実装も都市気候研究の重要な役割である。温暖化した将来の都市気候を前提に、より良い都市計画に貢献していく必要がある。

都市計画、建築環境で扱うレジリエンスには自然災害リスクに加え、感染症リスクなどの健康に関するリスクも含まれる。19世紀に誕生した西欧の近代都市計画では、ペストやコレラなどの感染症に対し、下水道網や広幅員道路の敷設など公衆衛生を改善する都市大改造が行われた。しかし、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う格差構造の固定化問題も起きた。今後の将来都市計画では、一部のみが利益を享受する社会ではなく、より良い長期展望を元にして、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）を一層高めた都市の構築を検討していく必要がある²⁾。

近年、世界的に非感染性疾患の患者数が増加している。非感染性疾患はがん・糖尿病・循環器疾患・呼吸器疾患等で生活習慣の改善により予防可能である。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。うつ病の人は世界で推計3億人以上と推計³⁾されていた中、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）のパンデミックによって悪化したとみられる⁴⁾。こうした非感染性疾患・精神疾患の蔓延は、人々の寿命やQOLを低下させるだけでなく、社会に対して甚大な経済的・社会的コストをもたらす。これらの疾患を減少させることが、特に先進国で大きな社会的課題となっている。近年、都市近郊林や緑地、里地里山、街路樹、屋上緑化等の都市の自然は上記の疾患の拡大防止に貢献し得ると指摘されている。緑地の訪問や街路樹を眺めること等の身近な自然との関わり合いが、人々に身体、精神、社会的健康便益をもたらすことが実際に明らかにされてきている。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、都市の自然を上手に活用し、より良い活用方策を講じる必要がある。

日本のような超高齢社会では、都市環境や住環境の熱的快適性の議論にとどまらず、特に健康維持と生命維持のための暑熱対策が不可欠となる。個人におけるライフスタイル転換は、クールビズやシェアライドなど様々あるが、従来の慣行からの行動転換を円滑に促す技術開発も重要である。

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、SDGsの達成に貢献し得る研究が増加している。SDGsでは都市に直接的に関わる目標11「住み続けられるまちづくりを」が存在する。SDGsの目標は互いに連関しているため、目標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（目標11）と住民の健康問題（目標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（目標13）とヒートアイランド現象（目標11）と住民の健康問題（目標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（目標9・11・13）。都市緑化は都市問題（目標11）と住民の健康（目標3）と陸域生態系の保護（目標15）に直接的に効果をもたらす、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の目標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する。

[研究開発の動向]

① レジリエンス、複合災害

自然災害への防災対策については、災害に対する抵抗力に加え、発生した被害に対して対応する回復力にも注目するレジリエンスの考え方が注目されている。回復力という観点で、これまでの命・財産から、事業・地域の継続ということが新たな防災の目標となっている。具体的には、経済被害の波及という観点からBCP、2015年に仙台で開催された国連防災会議では、いわゆるより良い復興（Build Back Better）が新たな防災課題となっている。災害の影響が連鎖する複合災害への関心が高まっている。

こういった背景を含めレジリエンスを定量的に定義しようとする取り組みが行われており、日本建築学会では建築物のレジリエンス性能を定量化する試み、米国においては地震災害後の復旧時間に着目した防災対策についての指針が示されるようになってきている⁵⁾。複合災害については、日本では南海トラフ地震、首都直下地震といった「国難」災害を対象に、複合・巨大災害の時系列・空間的な全体像を明らかにする取り組みが土木学会で行われている。

② 極端気象災害など自然災害のもたらす多様な影響評価

極端気象による影響について、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は個別の災害での報告どまりで、さらに進展が必要である。

これまであまり行われていなかった研究として、wild fire (野火。日本の国土に限れば山火事の訳で差し支えないが、大陸国ではwild fireは山だけでなく平地でも起こるため、野火と訳される。)の影響があげられる。直接の焼死のみでなく、燃焼によって生じる大気汚染物質による影響を考慮している。これも複合影響研究の一つと考えられ、発生に関する研究とともに、これまでの大気汚染研究の応用として論文の増加が予想される。

③ 温暖化影響予測シミュレーションモデル開発

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」(共生)(2002～2006年度)の成果が気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change: 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」(革新)(2007～2011年度)の成果がIPCC第5次評価報告書に、「気候変動リスク情報創生プログラム」(創生)(2012～2016年度)、「統合的気候モデル高度化研究プログラム」(統合)(2017～2021年度)の成果がIPCC第6次評価報告書に大きく貢献した。

④ 温暖化ダウンスケーリング

全球気候モデルの空間解像度は通常100～数100 km程度の空間平均値であり、都市住民の健康への影響予測・評価に適用できない。その空間解像度のギャップを埋めるため「温暖化ダウンスケーリング」技術が開発されてきた。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・統計的關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。文部科学省「気候変動適応研究推進プログラム」(2010～2014年度)で開発された温暖化ダウンスケーリングモデル^{6)、7)}は、地球スケールから大陸・国、地域、都市、街区・建物に至る気候・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。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。既に、将来の都市暑熱環境下の健康被害の推定⁸⁾や、暑熱環境に適応する都市・街区計画の検討⁹⁾などに応用され、都市計画などの政策決定に向けて重要な知見を提供している。

⑤ 都市暑熱化への都市、建築物スケールの緩和策、適応策

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。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。

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¹⁰⁾が開始されている。また、都市キャン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。

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。我が国ではクールルーフ、クールペイジメント、屋上緑化などのヒートアイランド緩和策から、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、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」¹¹⁾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。

海外では体系的な研究や実践の例は少ないが、適応策の観点から洪水対策などとともに都市における暑さ対策の施策が実施されている場合がある。世界では近年の熱波の出現頻度の増加を背景として、熱波と都市ヒートアイランド現象との関連性の研究が注目されている。

⑥ 熱ストレスによる健康被害の影響予測、評価と行動変容をともなう適応策

市町村など小さな区分における高気温の影響に関しては、いくつか報告があったものの、曝露である気温の計測地点がそれほど密でなかったり、死亡数が小さいために日別といった短期的な影響の評価は困難であった。通常の日別解析では、1日10人以上の死亡数が必要¹²⁾とされていた。死亡データに関しては、通常はせいぜい市町村レベルまでの情報しか解析用には得られないことが多いが、England & Walesなどではより細かい区分での死亡状況とともに社会経済状況の情報も得られるため、そのような地域では気温の影響に与える社会経済的な要因に関する調査も可能である。後の項目でも述べるが、この数年間で解析方法に大きな進歩が見られ、小さな地域であっても解析が可能になってきた。現在その方法での解析としてはEngland & Walesの評価が発表されたのみ¹³⁾だが、今後は同様の報告が世界各地からなされるものと思われる。それにともない、温暖化に加えて都市のヒートアイランド現象による気温上昇についても、今後は活発に研究がなされ、将来予測も行われると考えられる。

適応策について、当初よりエアコンの使用はGHGsの増加を伴うことから問題視された側面もあった。中長期的には電力を再生可能エネルギーに移行し、緩和策への悪影響を減少させていく必要があることは言うまでもない。しかしながら、近年の高気温による死亡・熱中症などは災害と考えるべきであり、緊急避難的には当然エアコンの使用は推奨されるべきである。むしろ、東京監察医務院「平成27年夏の熱中症死亡者の状況（東京都23区）」の報告にあるように、剖検で熱中症と診断された例の多くがエアコンのない部屋で過ごしていたか、エアコンがあっても使用していなかったとの報告がある。熊谷市で開始されたようなエアコンの設置補助に加え、何らかの経済的措置によって電気代の節約のためにエアコンを使用しないといった状況を改善するべきである。

それとともに、エアコンのみに頼らない方策も重要である。緩和策の面からも当然だが、国内でも必要

なだけの電力供給が得られない状況も発生する。たとえば福島原発事故の後の関東圏や2019年台風19号後に千葉県で発生したような電力不足の状況である。エアコン以外の一般的な適応策に関しては、地域特性によって大きく異なる¹⁴⁾。我が国にあった方策を研究していくべきである。たとえば、日本では湯船のある家が一般的である。エアコンが使用できない状況では湯船で行水する、非常に気温の高い昼間は湯船に避難する、といった対応など、生理学的な裏付けをとまなう研究開発とその普及が重要である。

⑦ 都市における身近な自然環境と人の健康との関係に関する研究

現在、公衆衛生学や都市計画学、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、主に都市緑地などの身近な自然との関わり合いは、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、注意欠陥・多動性障害（Attention-Deficit Hyperactivity Disorder : ADHD）の症状の減少）、社会的結合度（コミュニティの健全性）の向上、血圧の低下、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、認知機能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¹⁵⁾。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経路でもたらされると考えられている¹⁵⁾。

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、生態学者の参入により、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。実際に、一部の健康指標については、生物多様性（生物種の数）と健康指標の間に正の関係があることが分かってきている。例えば、緑地を訪問した時に得られる心理的効果（リラックス効果）は生物多様性が高い緑地で大きくなるのが多数の研究で報告されている。この健康と生物多様性の正の関係（Biodiversity-wellbeing仮説と呼ばれる）は現在盛んに研究が行われている分野であり、そのメカニズムについても徐々に明らかになりつつある。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。

⑧ Co-benefit（共便益）、トレードオフ

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。SLCFsである粒子状物質とオゾンの減少を通じて健康への悪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各国で始められている。

SLCFsの減少は健康増進につながるが、SLCFsは多様な成分の総称であり、オゾンや煤などの温暖化作用をもつ成分だけではなく、成分に応じて大気化学反応、放射攪乱効果、雲生成による間接効果により冷却化作用をもつとみられる成分もある。2023年から始まる予定のIPCC第7次評価サイクルにおいて、これまでの研究でわかっている知見をもとに「SLCFsに関する方法論報告書」を作成することがすでに2019年のIPCC第49回会合で決定されている¹⁶⁾

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。上述したエアコン利用についても含まれる。

⑨ 人口集中地区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。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、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世界ではプロジェクト研究が行われている。

⑩ 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。上述したような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。JSTと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-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。9つの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の理念を取り入れた制度が増えており、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。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

① 極端気象災害の頻発や国際情勢の激変に伴う気候変動緩和・適応への関心増大

2021年から順次公表されたIPCC第6次評価報告書を待つまでもなく、現在は「温暖化」のフェーズにあり、我が国でもここ数年は毎年、豪雨や台風による水害が起こっている。世界でも2022年は9月までにパキスタンで大洪水が発生したり、英国やスペイン、中国などでは夏の干ばつで水力発電ができなかったり農作物の収穫に悪影響が出たりした。生命への危険に加え、経済的損失も甚大化している。2050年までに世界人口の三分の二が都市に居住するようになることから、気候変動が都市環境と健康に与える影響は大きい。気候変動が都市に与える影響や適応について、2022年2月に公表されたIPCC第6次評価報告書第2作業部会報告書（影響・適応・脆弱性）においても第6章「都市、居住地、主要施設」と1つの章を設けている。一方で都市はGHGsの巨大排出源でもある。気候変動の緩和のための都市からのGHGs排出削減についても、2022年4月に公表されたIPCC第6次評価報告書第3作業部会報告書（気候変動の緩和）の第8章「都市システムとその他居住地」と1つの章を設けて詳述されている。2023年から始まる予定のIPCC第7次評価サイクルで、「都市と気候変動に関する特別報告書」を作成することがすでに2016年のIPCC第43回会合IPCC第43回会合で決定されている¹⁷⁾。

本俯瞰報告書で継続して指摘している通り、世界的に熱ストレスによる死亡者数、下痢性疾患、洪水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気候変動によってもたらされる¹⁸⁾と科学的にすでに予測されていた。そこに、前回の俯瞰報告書（2021年版）で述べた通り、COVID-19が流行し、我が国を含む世界各地で複合災害がもたらされた。さらに2022年2月にロシアによるウクライナ侵攻という大事件が勃発し、世界的な食料・エネルギー

問題が顕在化した。このような社会情勢のもとで、いかにして健康的な生活を守りながらエネルギー転換など気候変動への対策を現実社会で円滑に進めていくかを示す研究は、さらに重要性を増している。

② レジリエンス性能

建築分野では、BCPで設定される目標復旧時間（Recovery Time Objective：RTO）に着目し、建物のレジリエンス性能を定量的に評価する仕組みの構築に取り組みが行われている。日本建築学会「レジリエンス建築TF」（2019～2021年）が建物の利用可能床面積に着目した評価手法の開発、中層オフィスを事例に具体的な評価方法を提案している。米国では建物のダウンタイムに着目した評価手法（Recommended Options for Improving the Built Environment for Post-Earthquake Reoccupancy and Functional Recovery Time、FEMA P-2090/ NIST SP-1254 / January 20）が提案されている。日本土木学会と米国土木学会はインフラレジリエンスに関する共同研究を実施している。

③ 都市計画の動的レイヤーリング¹⁹⁾

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い課題がある。

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、例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求められる。

④ ハザードマップ

都市部での豪雨時の浸水予測が従来よりも正確にシミュレーションできるようになった背景から、日本では多くの自治体がハザードマップを作成・公開している。国土交通省は、洪水のほかにも土砂災害、津波のハザードマップ情報も提供している。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、3次元化して立体情報を含ませたり、下水管きよからの内水氾濫予測を含めた避難ルートマップにしたり、ハザードマップを高度化する検討が進められている。都市デジタルツインを産学官連携で構築し、防災に活用する検討も行われている。

⑤ タイムライン²⁰⁾

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ことで防災分野で有名となった。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などの対策を進め、被害を最小限にする手法である。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ている。

⑥ 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から採り上げられている。ソフト・ハード両面を混ぜ合わせた考え方で、自然の力を防災・減災に活用する“Ecosystem-based disaster risk reduction : Eco-DRR”という言い方でも注目を集めている。

国土交通省は「グリーンインフラ推進戦略」(2019年7月)を発表し、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」(2020年3月)を設立している。内閣府と環境省は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しており、グリーンインフラの整備を重要な施策の一つに掲げている。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。さらに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。

⑦ 都市農業²¹⁾

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。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²²⁾。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、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。我が国の「生産緑地の2022年問題」は10年先送りとなったが、都市近郊農地の宅地転用は今後も続くと思われる。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。都市農業のもつ多面的な便益、機能がもたらす価値を示し、長期的に魅力をもった新しい農住まちづくりにつなげていくことが重要である。

⑧ 用量反応モデル (dose-response model) の応用

特定の病原体が特定の集団に引き起こす感染症の発症、死亡等の影響の確率を、病原体の曝露量(用量=摂取量)の関数として表したものが用量反応モデルである。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²³⁾。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。

⑨ 文化的生態系サービス

レクリエーションや観光などを通して、人々が生態系から得る非物質的な利益を指す。生態系サービスとは、国際連合の主導で量的に取りまとめられた「自然の恵み」である。そこには、食料や木材などの供給、気候や水循環の調整などの物質的な効用とならび、人間のメンタルヘルスに対する恩恵も明記されている。しかし、このメンタルヘルスに対する恩恵の定量化は、他のサービスと比べて遅れている。

⑩ 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「経験の消失」という。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と指摘されている²⁴⁾。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。

⑪ デジタル技術の進歩、普及、さらなる活用

多くの人々が個人でスマートフォンを持つようになり、気象庁や各気象情報会社などが提供する雨雲レーダー(高解像度降水ナウキャスト)等の画面が、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大いに有効である。より効果的に用いられるための検討は引き続き重要である。

また、多くの人々がソーシャルネットワーキングサービス(Social Networking Service : SNS)などを

用いて容易に発信者となる時代となった。そこから得られるデータは膨大な量にのぼる。もちろん、統制された情報ではないため、その統計解析、解釈には注意が必要だが、これまで得られなかったような情報が得られる可能性を秘めている。

第一に、既存のスマートフォンからの情報だけでも、全地球測位システム（Global Positioning System：GPS）を介して小地域の気象との組み合わせでどの程度の高温に曝露しているかについての分布が得られる。そのような気温の曝露ごとにどの程度の人がSNSを通じて暑いと発信するかといった情報も得られる。

第二に、ウェアラブル端末が普及したことにより、そのような高温曝露情報と対応してそれぞれの個人の生理学的データも得られる。既存の心電図を組み込んだ端末を用いれば心拍の揺らぎから自律神経の状況も推定できる。

⑫ 仮想現実（Virtual Reality：VR）やコンピュータ・グラフィックス（Computer Graphics：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る。一般の災害体験施設などで、災害を我が事としてリアルにとらえるための活用も始まっている。

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も、VRやCGを用いた研究が行われている。自然度が異なる都市景観を再現するためにVRが使われている。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。

⑬ 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た。

⑭ 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の目標3（すべての人に健康と福祉を）と目標11（住み続けられるまちづくりを）の達成に資するため「WHO Housing and health guidelines（住宅と健康に関するガイドライン）」²⁵⁾を公表した。COVID-19を受けて従来の生活様式の大きな改変が求められたが、それを支えるハードとしての住宅のあり方も問われた。自宅で業務を行うテレワークも広がり、生活空間と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になった。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。

15 疫学研究手法の進歩

先述の England & Wales におけるロンドンをさらに小さい地域に分けて熱関連の健康影響を評価するには、それに対応した方法の開発が必要であった。詳細は Gasparrini (BMC Med Res Method 2022 ; 22 : 129) に譲るが、例えば死亡の研究の場合には、それぞれの死亡に対して、その日の気温と、対応する気温 (死亡発生日と同じ月の同じ曜日の別の日をとることが多い) とを比較することで気温の影響を評価するという conditional logistic regression を発展させた conditional Poisson regression を用いることで小地域での解析を可能にした。上記論文には例として実際のデータと計算用プログラムが提供されており、今後爆発的に普及することが予想される。

16 都市気候における暑さ対策の導入

暑さ対策として、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進んでいる。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が広がりつつある。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²⁶⁾。人流計測などに基づく利用者の行動特性と外部空間の温熱環境計画に関する研究にも関心が広がっている。

17 Co-benefit

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定されていて、将来予測に用いるような枠組みがなかった。最近では SLCFs 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たことから、国や全球レベルでの Co-benefit の評価を目指すプロジェクトもある。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ており²⁷⁾、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]

■国内

- 内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第2期「国家レジリエンス (防災・減災) の強化」(2018～2022年)

大規模災害時の避難支援や緊急対応の情報提供や広域経済活動の復旧支援、気候変動で激化する渇水対策の強化、さらには市町村等行政の対応力の向上のため、国や市町村の意思決定の支援を行う情報システムを構築し、国家レジリエンス (防災・減災) を強化するための研究を実施している。

- 内閣府他「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、9つのムーンショット目標 (長期的に達成すべき目標) が決定されている。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。

- 文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」(2020～2024年)

南海トラフ地震の震源域において「異常な現象」が起こった後の地震活動の推移を科学的・定量的データを用いて評価するための研究開発、「異常な現象」が観測された場合の住民・企業等の防災対策のあり方、防災対応を実行するにあたっての仕組みについて調査研究を実施している。

- データ統合・解析システム DIAS (Data Integration and Analysis System)

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気候変動適応技術社会実装プログラム (SI-CAT) (2015～2019年度) の研究成果が公開されている。

- JST COI-NEXT 地域共創分野「流域治水を核とした復興を起点とする持続社会 地域共創拠点」(2021年度～)

SDGs、ウィズ/ポストコロナ時代をふまえた未来の地域社会のあるべき姿を構想し、拠点の様々な研究や活動を行っている。COVID-19 蔓延化で洪水災害に被災した球磨川流域の持続的発展に寄与することを目指し、4つのターゲット、5つの研究課題を実施している。

- JST SDGsの達成に向けた共創的研究開発プログラム (SOLVE for SDGs: Solution-Driven Co-creative R&D Program 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ト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の様々な目標に貢献する研究が推進されている。

- ERCA 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、評価が行われている。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QOLをもとに気候変動の影響や脆弱性を評価されている。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。

- ERCA 環境研究総合推進費2-1805「気候変動影響・適応評価のための日本版社会経済シナリオの構築」(2018-2020年度)

これまで、共通社会経済経路シナリオ (Shared Socioeconomic Pathways: SSPs) としては全球を網羅する国別のものが提供されていた。当然ながら、北海道から沖縄まで、東京23区から地方都市、町村での相違は非常に大きいため、国レベルの平均的なSSPを用いることはできず、市町村別のSSPsが必須である。より細かく日本国内の市町村レベルの状況を表すために、日本独自のSSPjが開発された。これにより都市のヒートアイランド現象を考慮に入れた将来予測が可能になりつつある。また、2021年には1 kmメッシュに対応したSSPも開発が終了しており、健康を含む様々な分野での活用により、日本の気候変動将来予測の予測精度が格段に向上することが期待できる。

特に、健康で重要な指標である死亡については、SSPの開発で必ず取り扱われるため、その情報を用いて気候変動による熱関連超過死亡の推定などに応用可能である。

- 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 km) 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。

- 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

暑さ対策については、オリンピックのマラソンコースや会場および会場までのアクセス空間での対策が注目された。国際的な取り組みとしては、2019年7月にアメリカのローレンスバークレー国立研究所において Cool Building Solutions for a Warming World: Working Group Workshop が開催され、アメリカ、カナダ、イタリア、フランス、日本、インドなどの研究者と実務者が参加し相互の取り組み状況が確認され、国際連携の可能性が議論された。その後も継続的な取り組みがweb会議などにより実施されている²⁸⁾。神戸市の都心部における異常高温対策の実践、千代田区の丸の内仲通りの街路環境整備プロジェクトなどが先進事例として位置付けられる。

■ 国外

- 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)

- EU・Horizon2020 (2020-)

EUの研究プロジェクトHorizon2020 (現在、Horizon Europe) において、防災関連プロジェクトも実施されている。

- 米国ウェルカムトラスト財団による Co-benefit 研究

Wellcome Trust は、気候変動と健康を重点分野の3本柱の一つとした。これによって、気候変動の感染症への影響や、いわゆるコベネフィットアプローチとして、食生活の改善 (ベジタリアンの増加により、牛からのメタンを減少させるなど) による緩和策への貢献とともに健康な生活をおくことを模索するなどといったプロジェクトに研究費が供給されていくものと考えられる²⁹⁾。

- Bill & Melinda 財団による研究助成

Bill & Melinda 財団の援助を受けた、気温の死亡に与える影響に関する論文が発表された。しかし、問題点を指摘する Letter が掲載されたり、統計学者のブログで利益相反にも関連するのではないかとの疑義が示されたりと、この分野をリードするロンドン大学衛生熱帯医学大学院主導の MCC (Multi-City Multi-Country) 研究とは異なる推定値が出されており、今後問題になる可能性をはらんでいる。

- BlueHealth プロジェクト (2016~2020)

英国エクセター大学の The European Centre for Environment & Human Health が主導した³⁰⁾。様々な分野の研究者が参画し、都市を始めとした様々な「blue space」(河川や湖、海岸などの自然環境) が人々の健康に与える影響を評価した。

(5) 科学技術的課題

① 建築物・都市のレジリエンス性能の定量的評価

建築物のレジリエンス性能評価についてオフィスビルについて検討されているが、病院・工場といった他用途の建物への展開、実被害にもとづく評価手法の検証が必要となっている。建築物から都市レベルにレジリエンス性能評価を拡大していく必要があるが、都市システムのモデル化、地域コミュニティといったソフトな側面をどう評価するのが課題となっている。

② 地域の脆弱性評価

地域の持つ脆弱性をどのように同定し評価していくかも課題である。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。シナリオによって将来予測は変動する。追加的適応策の導入にあたり、現時点の脆弱性が、ある将来シナリオに基づくものかの政策的判断がなされる。

③ 健康効果をもたらす自然の「種類」、「量」、「質」の特定

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と分かってきたが、まだ多くの学術的・応用的課題も存在する。例えば、「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³¹⁾、野生生物がもたらす健康効果にも注目が集まっている。どのくらいの「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られるかも不明である。最近豪州で行われた研究では、都市緑地から得られる健康効果は「週に30分の利用」で十分に得られると指摘されている（それ以上利用しても健康状態の改善は見られない³²⁾。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。

④ 都市ヒートアイランド対策

都市の気温上昇は気候変動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数多くの暑熱対策の研究実績、知見が果たす役割がますます重要になっている。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。日本はカーボンニュートラル化を進める必要があるが、気候変動の緩和策は日本一国の努力のみでは達成しない。日本の諸都市の場合、気候変動に伴う都市の気温上昇に対して、各種の都市ヒートアイランド対策の導入により相殺させた適応策を目指すしかない。

個々の技術としてはクールルーフ、クールペイジメント、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。

都市計画への反映のための仕組みづくり（自治体における気候変動適応策への反映など）も課題である。世界では気候変動（熱波が代表事例）と都市ヒートアイランドの関連性、それらが冷房負荷、電力消費量、死亡率や罹患率、汚染物質濃度などに及ぼす影響の研究に注目が集まっている。

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。

⑤ 社会的混乱期における自然の役割

COVID-19は社会に大きな混乱をもたらした。この間、都市の自然は人々の精神的健康に大きく寄与したことを示す研究が多数出版されている³³⁾。また、人々の自然利用（都市公園の利用や庭先での野生動物への餌やり）が急増したことも報告されている³⁴⁾。これらの事実は、COVID-19のパンデミックのような

社会的混乱期において、都市の自然は人々の心の健康やレジリエンスにとって重要な役割を果たすことを示唆している。これらの効果を検証することは、今後同様の社会問題が起きた際に重要な洞察を提供するものである。そのため、現在のような社会的混乱期において、平時には見られない自然の効果を検証することは有益だと考えられる。

⑥ 健康効果における地域差・個人差の評価

既往研究により、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と分かってきた。しかし、実際の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、ヨーロッパでの比較的寒冷な地域で行われてきた既往研究では、自然との接触は様々な健康便益をもたらすと結果が出たが、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³⁵⁾。自然体験がもたらす健康効果には個人差もある。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³⁶⁾。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ことが今後の課題である。

⑦ Co-benefit 評価

Co-benefit 評価のための、SLCFs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、その妥当性の評価が課題となっている。

⑧ 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、GHGs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。

⑨ 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、これまでに被験者実験などを通じて得られた研究実績・知見が数多くある。これらと、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（熱中症健康被害の推定等）が可能となる。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必要がある。

⑩ 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。

⑪ 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

的研究でこれまで行われている。そのため、必ずしもエビデンスレベルが高くないものも含まれる。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。

12 客観的な健康指標の活用

自然による健康効果に関する多くの既往研究では、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）が用いられている。この手法には様々なバイアスを含む可能性があり、より客観的な手法に立脚した研究が求められる。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）を用いれば、より客観的なストレスレベルを評価できる。最近、ウェアラブル端末型常時測定バイタルセンサーで得られる生理学的指標データが増加しており、その自動的データ収集システムや解析を行う研究が注目されている。

13 多岐にわたる分野での適応策に対する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。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といった課題がある。

14 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。住宅内の暑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。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。

15 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の目標間の関係性を分析するネットワーク解析が必要である。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て、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。

(6) その他の課題

1 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。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。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。

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、気象・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、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。

本領域の重要テーマの研究を推進するには極めて広い学際研究や関係ステークホルダーとの連携が必要となる。学際研究1点のみのメリットやデメリットのみでは持続可能でレジリエンスある都市計画につながらない。気候変動適応策と緩和策、レジリエンス、感染症、生物多様性、心身の健康、日々の快適性・利便性と災害時の脆弱性の関係、それらを総合した都市の魅力などにおける、シナジー・トレードオフを複眼的思考でとらえる必要がある。その基礎を据えるための学術研究においても、まだ垣根を超えた連携がそれほど進んでいないのが実情であり、促進する必要がある。

② データ整備の遅れ：アクセス性、不統一、信頼性

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い。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にアクセスする必要がある。このために研究者の作業時間、研究費は相変わらず大きな負担になっている。個人情報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、気候変動影響、医学研究、都市環境学など広範な分野で有益である。

我が国の健康分野の研究者はこれまで疫学的な方法論を用いて影響評価を行ってきた。行政と適切に協力すれば、適応策の効果に関する評価も可能な手法は存在する。しかし、行政側に効果を評価するという意識が乏しく、よかれと思われる方策の実施に留まっている。費用対効果もほとんど考えられていない。

COVID-19で明らかになったが、公的に収集される健康関連データの電子化が進んでいない。過去のデータはつぎはぎだらけで統一的影響解析ができない状況で、将来の使用に向けた統一フォーマット化などの進展や検討も進んでいない。現時点で、死亡小票データを解析できるのは早くても翌年の秋以降である制約は、解析研究のボトルネックとなっている。死因などの検討にある程度時間がかかることは理解されるものの、速報値としての計算は、電子化がしっかり進んでいけば現時点でも、ほぼリアルタイムに可能になるはずである。

③ 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ムティックレビュー、ランダム化比較試験 (Randomized Controlled Trial : RCT)、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。

④ 社会実装に向けたステークホルダー連携、人材育成の持続的仕組み：実務者やコミュニケーターまで含めた連携と人材育成、社会実装の機会の拡大

適応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る。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。

都市における社会実装においては、自治体単位での都市計画へ反映のための仕組みづくりが課題である。

モデル自治体などを設ける施策で意欲ある人材の登用や経験蓄積が進められたが、人材は全国的に育成する必要があり、いっそう拡充しなければならない。

日本人の博士課程へ進学する学生の減少が続き、今後の研究開発をリードする人材が確保されていない課題がある。産業界で博士人材を確保する動きもあるが、マルチキャリアパスの視点が学生に伝わっていないことも課題である。

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年以上活動しているが、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といった課題がある。今後の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。大阪ヒートアイランド対策技術コンソーシアムは大阪・関西万博のTEAM EXPO2025 共創チャレンジに登録し、万博会場における暑さ対策評価での貢献（協賛）を提案している。

5 複合災害への備え：自然災害（洪水、暑熱、干ばつ、台風、地震、噴火等）、感染症等の同時発生

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が報告された³⁷⁾。その停電の原因は気候変動と無関係であったが、2019年に千葉県で台風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。我が国のみを觀察しても、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。

2020年に熊本県では、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。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。

6 追加的気候変動適応策の推進

前回の本俯瞰報告書（2021年）以降も各国で、洪水、熱波、森林火災などの極端気象災害、感染症拡大などの災害により、住民への具体的な被害や社会的・経済的な損害が出ている。地震や噴火も世界各地で発生し、生命や経済的に大きな悪影響を与えている。これらがきっかけで、緩和策との両輪で適応策の研究や実装を進めざるを得ないこと、脆弱性の高い地域や住民が最も悪影響を受ける、といった従前からIPCCが指摘していた指摘も少しずつ一般に認識されつつある。

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始することとなる。

7 国際連携

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。

低中所得国での感染症疾病発生率のデータは質的、量的に不十分である。この解決に近道はない。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なデータも収集可能となる。

(7) 国際比較

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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 温暖化ダウンスケーリングなど特徴のある研究が行われている。 ● 日本建築学会レジリエンス建築タスクフォースにおいて、都市・建築にもとめられるレジリエンスという防災性能について、その基本概念の整理、社会実装の方法論、学会における継続的な検討・活動の必要性、さらにはレジリエントな都市・建築の様々な可能性について示している³⁸⁾。 ● 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。 ● 多くの市町村レベルあるいはそれ以下の解像度の気象モデルの開発が引き続き盛んに行われている。 ● 熱中症救急搬送データという日本特有のデータが簡単に入手できるようになり、その解析が進みつつある。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 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。 ● 国際的な枠組みで、日本在住の研究者も一定の貢献を果たしている。 ● 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。 ● SSPjなど、実際の政策に貢献できる研究も進んでいる。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 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。 ● 米国連邦危機管理庁と米国標準技術研究所が地震後の建物のダウンタイムに着目した研究成果を発表した。コンサルタント会社のArup社はレジリエンスという考え方にもとづく設計システムの提案を行っている^{5)、39)}。 ● 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。 ● プライバシー保護の行き過ぎで死亡データの使用に制限がかかるなど、研究の面からは困難な状況。画期的な業績は出ていないが元々ポテンシャルは高く、論文は多く出されている。

	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●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。 ●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。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²⁸⁾。 ●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⁴⁰⁾。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。 ●トランプ前政権下でCDCやEPAなどの予算が削減され、研究開発が滞っていた。
欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●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。Horizon 2020 関連で防災に関する研究プロジェクト、例えばリスクコミュニケーションに関するプロジェクトが行われている。 ●都市生態学分野を基礎、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。多くの国際プロジェクトが実施されてきている。2017年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。 ●クールルーフ技術はEuropean Cool Roofs Councilで認証されている⁴¹⁾。 ●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 TC 268 – 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内の各目標の相互作用を定量化する研究などを進めており、注目される。London School of Hygiene and Tropical Medicineが引き続き気候変動の健康影響研究を牽引し、そこで育った研究者、共同研究で関与している研究者は全世界に及ぶ。 ●ドイツのポツダム気候影響研究所がISI-MIPを管理・発展させている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●応用面でも伝統的に世界をリードしている。国際的な枠組みでの研究をリードし、最新の知見を世界に発信し続けている。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。引き続き気候変動適応策についての出版がなされている。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。 ●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。Horizon 2020の後継となるHorizon Europeの枠組みにおいても、本分野を継続、発展するとみられる。 ●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。 ●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。

中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 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。 ● 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	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 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。 ● 潤沢な資金により、論文数は増大しているが画期的な論文、独創的な研究は多くない。
韓国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 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。 ● 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。 ● それほど画期的な論文は多くない。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 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、本分野に関する研究を積極的に進めている。 ● 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。
その他の国・地域	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 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。 ● ニュージーランドでは、2011年クライストチャーチ地震以降、The Joint Centre for Disaster Research, Messy Universityにおいて総合的な防災対策に関する研究を実施している。 ● 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。 ● オーストラリアは、The University of SydneyのProf. Ollie Jayが中心となって、温熱生理学的な観点からの気候変動適応策研究を行っている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 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⁴²⁾。 ● 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。 ● オーストラリアは、クールルーフによるヒートアイランド緩和効果、省エネルギー効果などを集中的に研究し、企業などと連携したワークショップを積極的に実践している⁴³⁾。

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国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。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・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」

↗：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・建物エネルギー利用 (環境・エネ分野 2.3.1)
- ・ エネルギーシステム・技術評価 (環境・エネ分野 2.5.2)
- ・ 気候変動観測 (環境・エネ分野 2.7.1)
- ・ 気候変動予測 (環境・エネ分野 2.7.2)
- ・ 水循環 (水資源・水防災) (環境・エネ分野 2.7.3)
- ・ 社会一生態システムの評価・予測 (環境・エネ分野 2.8.1)
- ・ 農林水産業における気候変動影響評価・適応 (環境・エネ分野 2.8.2)
- ・ 環境リスク学的感染症防御 (環境・エネ分野 2.8.4)
- ・ 社会におけるAI (システム・情報分野 2.1.9)
- ・ 災害対応ロボット (システム・情報分野 2.2.9)
- ・ インフラ保守ロボット (システム・情報分野 2.2.10)
- ・ デジタル革新 (システム・情報分野 2.3.1)
- ・ メカニズムデザイン (システム・情報分野 2.3.4)
- ・ 社会におけるトラスト (システム・情報分野 2.4.7)

参考・引用文献

- 1) 三村信男「IPCCにおける議論の動向と気候変動研究の課題」『俯瞰ワークショップ報告書 気象・気候研究開発の基盤と最前線に関するエキスパートセミナー』国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター (2022), 35-46., <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2021/WR/CRDS-FY2021-WR-06.pdf>, (2023年2月1日アクセス) .
- 2) 横張真「With/post Corona時代の新しい都市地域づくり」『俯瞰ワークショップ報告書 感染症問題と環境・エネルギー分野に関するエキスパートセミナー』国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター (2021), 35-46., <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2020/WR/CRDS-FY2020-WR-08.pdf>, (2023年2月1日アクセス) .
- 3) World Health Organization (WHO), “Depression and Other Common Mental Disorders: Global Health Estimates,” <http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/254610/WHO-MSD-MER-2017.2-eng.pdf;jsessionid=41626349B10204DB31210F9B03B4FE60?sequence=1>, (2023年2月1日アクセス) .
- 4) World Health Organization (WHO), “Mental Health and COVID-19: Early evidence of the pandemic’s impact : Scientific brief, 2 March 2022” https://www.who.int/publications/i/item/WHO-2019-nCoV-Sci_Brief-Mental_health-2022.1, (2023年2月1日アクセス) .
- 5) Siamak Sattar, et al., “Special Publication: Recommended Options for Improving the Built Environment for Post-Earthquake Reoccupancy and Functional Recovery Time,” National Institute of Standards and Technology (NIST), <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1254>, (2023年2月1日アクセス) .
- 6) 飯塚悟「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」文部科学省 気候変動適応研究推進プログラム (RECCA), <https://www.restec.or.jp/recca/staticpages/index/iizuka.html>, (2023年2月1日アクセス) .
- 7) 高橋桂子「都市・臨海・港湾域の統合グリーンイノベーション」文部科学省 気候変動適応研究推進プログラム (RECCA), <https://www.restec.or.jp/recca/staticpages/index/takahashi.html>, (2023年2月1日アクセス) .

- 8) 日下博幸, 他「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: 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」『日本建築学会環境系論文集』78巻693号(2013): 873-881., <https://doi.org/10.3130/aije.78.873>.
- 9) Satoru Iizuka, et al., “Environmental impact assessment of introducing compact city models by downscaling simulations,” *Sustainable Cities and Society* 63 (2020) : 102424., <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102424>.
- 10) 国立研究開発法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC), 名古屋工業大学, 国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST)「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」JST, <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20190723-2/index.html>, (2023年2月1日アクセス) .
- 11) 環境省「まちなかの暑さ対策ガイドライン改訂版(平成30年3月)」環境省 熱中症予防情報サイト, https://www.wbgt.env.go.jp/pdf/city_gline/city_guideline_full.pdf, (2023年2月1日アクセス).
- 12) Krishnan Bhaskaran, et al., “Time series regression studies in environmental epidemiology,” *International Journal of Epidemiology* 42, no. 4 (2013) : 1187-1195., <https://doi.org/10.1093/ije/dyt092>.
- 13) Antonio Gasparri, et al., “Small-area assessment of temperature-related mortality risks in England and Wales: a case time series analysis,” *Lancet Planetary Health* 6, no. 7 (2022) : e557-e564. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00138-3](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00138-3).
- 14) Ollie Jay, et al., “Reducing the health effects of hot weather and heat extremes: from personal cooling strategies to green cities,” *Lancet* 398, no. 10301 (2021) : 709-724., [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)01209-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)01209-5).
- 15) Terry Hartig, et al., “Nature and Health,” *Annual Review of Public Health* 35 (2014) : 207-228., <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-032013-182443>.
- 16) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Methodology Report on Short-lived Climate Forcers,” <https://www.ipcc.ch/report/methodology-report-on-short-lived-climate-forcers/>, (2023年2月1日アクセス) .
- 17) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “REPORT OF THE FORTY-THIRD SESSION OF THE IPCC, Nairobi, Kenya, 11 - 13 April 2016,” https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/final_report_p43.pdf, (2023年2月1日アクセス) .
- 18) World Health Organization (WHO), “Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s,” <https://apps.who.int/iris/handle/10665/134014>, (2023年2月1日アクセス) .
- 19) 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」公益社団法人日本都市計画学会 都市計画法50年・100年企画特別委員会, <https://www.cpij.or.jp/com/50+100/docs/3rd03yokohari.pdf>, (2023年2月1日アクセス) .
- 20) 国土交通省「タイムライン」 <https://www.mlit.go.jp/river/bousai/timeline/>, (2023年2月1日アクセス) .
- 21) 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」日本学術会議, <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-h170719.pdf>, (2023年2月1日アクセス) .
- 22) Masashi 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., <https://doi.org/10.3390/ijerph14010071>.
- 23) Danielle F. Shanahan, et al., “The Health Benefits of Urban Nature: How Much Do We Need?” *BioScience* 65, no. 5 (2015) : 476-485., <https://doi.org/10.1093/biosci/biv032>.
- 24) Masashi Soga and Kevin J. Gaston, “Extinction of experience: the loss of human-nature interactions,” *Frontiers in Ecology and the Environment* 14, no. 2 (2016) : 94-101., <https://doi.org/10.1002/fee.1225>.
- 25) World Health Organization (WHO), “WHO Housing and health guidelines,” <https://www.who.int/publications/i/item/9789241550376>, (2023年2月1日アクセス) .
- 26) Hideki Takebayashi and Masakazu Moriyama, *Adaptation Measures for Urban Heat Islands* (Cambridge: Academic Press, 2020).
- 27) Satbyul Estella Kim, et al., “Air quality co-benefits from climate mitigation for human health in South Korea,” *Environment International* 136 (2020) : 105507., <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105507>.
- 28) Heat Island Group, “Cool Building Solutions for a Warming World: Working Group Workshop,” Berkeley Lab, <https://heatland.lbl.gov/content/cool-building-solutions-warming-world>, (2023年2月1日アクセス) .
- 29) Wellcome, “Digital Technology Development Awards (Climate-Sensitive Infectious Disease Modelling),” <https://wellcome.org/grant-funding/schemes/digital-technology-development-awards-climate-sensitive-infectious-disease>, (2023年2月1日アクセス) .
- 30) BlueHealth, <https://bluehealth2020.eu/>, (2023年2月1日アクセス) .
- 31) Daniel 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>.
- 32) Danielle F. Shanahan, et al., “Health Benefits from Nature Experiences Depend on Dose,” *Scientific Reports* 6 (2016) 28551., <https://doi.org/10.1038/srep28551>.
- 33) Masashi Soga, et al., “A room with a green view: the importance of nearby nature for mental health during the COVID-19 pandemic,” *Ecological Applications* 31 (2021) : e2248., <https://doi.org/10.1002/eap.2248>
- 34) Masashi Soga, et al., “Impacts of the COVID-19 pandemic on human-nature interactions: Pathways, evidence and implications,” *People and Nature* 3 (2021) : 518-527., <https://doi.org/10.1002/pan3.10201>
- 35) Le E. Saw, Felix K. S. Lim and Luis R. Carrasco, “The Relationship between Natural Park Usage and Happiness Does Not Hold in a Tropical City-State,” *PLoS ONE* 10, no. 7 (2015) : e0133781., <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133781>.
- 36) Chia-chen 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., <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103874>.
- 37) G. Brooke Andersen and Michelle L. Bell, “Lights out: Impact of the August 2003 Power Outage on Mortality in New York, NY,” *Epidemiology* 23, no. 2 (2012) : 189-193., <https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e318245c61c>.
- 38) 一般社団法人日本建築学会レジリエント建築タスクフォース『レジリエント建築タスクフォース報告書』(日本建築学会, 2021).
- 39) Arup, “REDi Rating System,” <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/>

section/redi-rating-system, (2023年2月1日アクセス) .

40) Cool Roof Rating Council (CRRC), “Roof Rating Program,” <https://coolroofs.org/product-rating/overview>, (2023年2月1日アクセス) .

41) European Cool Roofs Council (ECRC), “PRODUCT RATING PROGRAMME,” <https://coolroofcouncil.eu/rating-programme/>, (2023年2月1日アクセス) .

42) Singapore Green Building Council (SGBC), “SGBC Green Certification,” <https://www.sgbc.sg/sgbc-certifications>, (2023年2月1日アクセス) .

43) School of Built Environment, Faculty of Arts, Design and Architecture, University of New South Wales (UNSW), “Study on the Cool Roofs Mitigation Potential in Australia,” UNSW, <https://www.unsw.edu.au/arts-design-architecture/our-schools/built-environment/our-research/clusters-groups/high-performance-architecture/projects/study-on-the-cool-roofs-mitigation-potential-in-australia>, (2023年2月1日アクセス) .

2.8

人と自然の調和