

ヒートアイランド問題の考え方

The Points of Countermeasures against Urban Heat Island Issue

大阪大学名誉教授
(Professor Emeritus, Osaka University)
水野 稔
(Minoru Mizuno)

キーワード： ヒートアイランド(urban heat island)、対策計画(planning of countermeasures)、Q&A(Q&A)、大気熱負荷(thermal load on the atmosphere)、都市代謝系(urban metabolic system)、都市空間デザイン(design of urban space)

1. はじめに

ヒートアイランド研究には世界では 200 年の歴史があるが、それは一貫してサイエンスの対象であった。そこでは、実態把握、形成メカニズムなどの研究が主として行われてきた。ヒートアイランドが「対処すべき環境問題」と位置づけられたのは最近である。わが国では、平成 16 年 3 月に政府が「ヒートアイランド対策大綱」を定めたことにより、公式にその位置づけがなされた。これは、問題がエンジニアリングの対象になったことを意味する。それを受けて、主要自治体ではヒートアイランド対策計画が策定され始めている。

ヒートアイランドにはさまざまな側面があるが、ここでは総合エンジニアリングの対象として、問題解決を目指す「対策計画立案」の側面から、その考え方について Q&A 形式で述べる。また、本稿の内容の詳細は出版本「ヒートアイランド対策（都市平熱化計画の考え方・進め方）：空気調和・衛生工学会編（2009 年 4 月）オーム社」を参照いただければ幸いである。

2. ヒートアイランド問題の考え方に関する Q&A

2.1 ヒートアイランド問題の基本的な位置づけ

<Q1>ヒートアイランド問題や地球温暖化と 1960 年代の公害と何が違うのか

<A>公害問題と温暖化問題の比較を下表に示す。詳細説明は出版本に譲る（出版本 p.4）が、大きな違いは、公害問題は処理専門家にまかせた対応が主であるが、温暖化問題は都市や生活の構造変化などの根本的対応が主であり、あらゆるセクターが主役となる点である。

	公害問題	温暖化問題
汚染の種類	化学汚染	物理汚染（熱汚染）
公害の種類	産業公害	都市型公害
主たる対処技術	処理技術（エンド・オブ・パイプ対応）	都市構造の変革、省エネルギー社会の構築
対策にあたる主たる技術者	処理技術者	全都市構築技術者
クリーンエネルギーの投入	有効	無効

<Q2>地球温暖化問題とヒートアイランド問題は何が違うのか

<A>地球温暖化問題とヒートアイランド問題の相違を下表に示す。詳細な説明は省略（出版本 p.5）するが、最も大きなものは、地球の温暖化はグローバル問題であり、環境負荷（二酸化炭素）をどこ

で出すのか、いつ出すのかは問題ではなく、総量のみが問題である。ライフサイクルアナリシスがこの問題で発展したのは、この特性による。一方、ヒートアイランド問題では、環境負荷（熱）をどこで出すのか、いつ出すのが重要な因子となるローカル問題である。また、地球温暖化では、化石燃料由来（人工）の二酸化炭素が主であるのに対して、ヒートアイランド問題では、人工排熱と太陽フロー熱起因の熱の両者があるなど、負荷構造が複雑である。このような相違点もあるが、類似点も多い。なお、問題解決の重要性に対する社会の認知度は地球温暖化が圧倒的に高い。したがって、ヒートアイランド対策の推進は地球温暖化に対する動きに連動させるのが戦術的に好ましいと考えられる。

	地球温暖化問題	ヒートアイランド問題
環境負荷	二酸化炭素（人工）	熱（人工、自然）
評価ベース	一次エネルギー	二次エネルギー
空間スケール	グローバル	ローカル
時間スケール	長期	24 時間

＜Q3＞温暖化問題には地球問題や都市問題のように空間スケールによる階層性がある。それらの相互関係や、そこから読み取れる対策のあり方はいかなるものか？

＜A＞温暖化問題の階層性という概念は、理解を深めるのに有用と考えられる。すなわち、温暖化にはつぎの3つのスケールがある。すなわち、①室内温暖化問題、②都市温暖化問題、③地球温暖化問題、である。現在の都市づくりは、熱代謝（熱の放散）の困難な都市を作っておいて、冷房で①の解決を図るものである。なお、冷房技術は①の解決を「エネルギーの投入」で「室内の熱を外部に放出」するものである。前者で③に、後者で②につけを回す可能性をもつ問題のある技術といえよう。これは、地域環境問題の解決に適用された「高煙突技術」と同じ構造である。衆知のように、高煙突は地域環境問題の解決に寄与したが、より大きな地球規模の酸性雨問題を引き起こした。安易に冷房に頼るのは、より困難な問題に転嫁する可能性がある。

2.2 都市代謝系におけるエネルギー・熱代謝系

＜Q4＞ヒートアイランド問題は都市システムのいかなる欠陥の表れなのか

＜A＞都市づくりにおいて、熱代謝を考えてこなかった点に原因がある。出版本ではガイアのデザインである自然空間で重視されている熱代謝機能が、人間のデザインである現代の都市では考えられていない点を説明している（出版本 p.12）。また、都市代謝系という考え方がある。これは都市を生体に見立てる考え方である。生体には、食物、水、空気が取り入れられ、生体機能を発揮させ、最終的に廃棄物として捨てられる。これが代謝系である。都市にも、もの、水、エネルギーが取り入れられ、都市機能を果たし、最終的に廃棄物となって捨てられる。これを都市代謝系として見ようとするものである。ものの流れを物質代謝系、水の流れを水代謝系と呼ぶのは、土木系工学で行われている。「エネルギーの流れにもこの考え方を適用すべき」が筆者らの提案である。エネルギー（電力・都市ガス・石油などの生活支援エネルギーのほか、降り注ぐ太陽熱なども含まれる）は都市に入って、最終的には熱となって放散される。筆者らはこれを「エネルギー・熱代謝系」と呼んでいる。都市代謝系には供給インフラと処理インフラがある。下表に各都市代謝系のそれらを挙げた。エネルギー・熱代謝系には処理インフラの概念が存在していない。この欠陥がヒートアイランド現象を引き起こしていると見ることができる。エネルギー・熱代謝系にも「処理」が必要である。

都市代謝系	供給インフラ	処理インフラ
物質代謝系	流通システム	ごみ焼却場
水代謝系	上水道	下水道
エネルギー・熱代謝系	電力・都市ガス・石油	なし

<Q5>これはわが国だけの問題なのか？世界はどうなっているのか？

<A>欧米先進国は概ね寒冷地にある。ここでは都市づくりにおいて熱代謝を考える必要はない。わが国は、徒然草で兼好法師が「住まいづくりは夏を旨とすべし」といったように、夏の暑さが課題である。このような地において、欧米先進国をモデルとする都市を造り、その結果の室内温暖化問題を冷房で凌ぐのは、正しい方向とは言えない。ここでは、「都市づくりも夏を旨とすべし」を具現化すべきである。発展途上国は概ね、このような都市である。わが国が、正しい「熱代謝考慮都市のモデル」を示すことは、きわめて重要な課題である。

<Q6>熱代謝の困難な都市とは？熱代謝配慮都市とは？具体的イメージを示してほしい？

<A>①熱的に重い都市、②水代謝と熱代謝の連携を断つ都市、③風通しの悪い都市、④エネルギーを大量消費する都市、等である。①は、コンクリートやアスファルトのように熱容量の大きな素材で造る都市である。これは、日中の熱を夜間に持ち越す。夜間は、熱の拡散性が悪く、熱を地表面近辺に滞留させることでヒートアイランドを助長する（出版本 2.1.2 参照）。②は、緑地・水面を消失させて、水の「顕熱の潜熱化作用」を低減化している（出版本 1.3.5 等参照）。③は、無計画な建物配置で風通しを悪化させ、熱の放散を悪くしている。大阪などでは、海風が吹き（出版本 p.32 など参照）、それは都市の貴重な冷却源である。④は言うまでもないであろう。熱代謝配慮都市は、上の①～④を改善した都市と言えよう。もちろん、アスファルトやコンクリートには大きな便益があり、これらの使用を否定できない。都市の状況に応じた空間やシステムのデザインを行い、十分な熱代謝機能を発揮させるべきである。

2.3 熱の処理

<Q7>熱の処理とは？

<A>筆者らは、水の蒸発による顕熱の潜熱化を熱の処理と位置付けている。なお、人工排熱のみならず太陽フロー熱起源の地表面から大気に流れる顕熱の潜熱化（緑地化や水の蒸発）も処理として位置づけるべきである。処理の対象となる人工排熱は、冷房排熱、煙突や排気筒等からの排熱が考えられる。冷房は熱を集める技術であり、現在は集めた熱を捨てるのに何の配慮もなされていないのは、大きな欠陥である。なお、暖房は熱が拡散する方向であり、熱の処理には向かないし、処理する必要もない。なお、出版本では「熱代謝と水代謝の連携都市」や「蒸発促進都市」の提案をしている（出版本 p.19 など）が、これは処理を備えたエネルギー・熱代謝系の好ましい姿と見ることができる。

<Q8>冷房は都市温暖化を助長する悪い技術か？

<A>もちろん、冷房の効用は大きく、安易な適用は避けるとして、弊害を認識してその最小化を図るのが妥当であろう。弊害についての上述した「冷房は室内温暖化問題を都市温暖化につけを回す可能性のある技術」についてコメントしておく。確かに乾式放熱器をもつ冷房は、その特性をもつ。しかし、熱の処理（湿式放熱器の採用）により、室内も室外も気温を下げることも可能である（出版本 p.14 コラム 11、p.18 コラム 13 参照）。

＜Q9＞都市の熱を処理するのに膨大な水が要るのではないかと、最近問題になっている都市型の集中豪雨を助長しないか？

＜A＞蒸発潜熱はきわめて大きく、それほど大量の水は必要ではない。具体的には、200m²の土地で1日35mmが一つの目安（p.19 コラム 14）である。この水量は、それを地上に均一に分配した場合、厚さ0.175mmである。現在、ヒートアイランドが都市のゲリラ豪雨の一因と考えられているが、顕熱で気温を上げる方が、潜熱で湿度を上げるよりも空気の密度は小さくなる（空気線図などで確認できる）。したがって、空気を収束させて上昇気流を起こす駆動力は、潜熱化するほど小さくなる。空気中の湿分は海などの自然補給が圧倒的で、ヒートアイランド対策で加えられる水分は集中豪雨を緩和すると考えられる。

＜Q10＞気温は蒸発で下げられるであろうが、湿度が上がって蒸し暑くなるのではないかと？

＜A＞たしかに物理的に湿度が上がるが、蒸発潜熱はきわめて高く、湿度上昇はそれほど大きくはない（定量的には p.18 コラム 12 参照）。筆者の私見は、細部にとらわれ対策を遅らせるよりも、当面は顕熱のみをターゲットとして、その低減化を目指す対策を推進する方がよいと考えている。

2.4 ヒートアイランド対策のあり方（自主行動型から重点投資型へ）

＜Q11＞現在のヒートアイランド政策の欠陥は何か？

＜A＞現在の温暖化対応（ヒートアイランドも地球温暖化も）は「善意の自主行動型」である。ここにおける対策計画は、「問題の重要性の訴え」「各主体の取り得る対策メニューの提示」「協力の呼びかけ」からなっている。これで問題が解決すれば美しい姿であるが、そんなに問題は簡単ではない。これを「重点投資型」に変えていかねばならない。これは、削減能力のあるところに資金と削減義務を割り当てていくものである。

＜Q12＞重点投資型ではいかなる技術情報が必要となるか？

＜A＞自主行動型では、自分の分野内で対策を打つことが一般的である。ここでは、技術の評価が甘くても構わない。一方、重点投資型では、対策の相互評価が不可欠であろう。今までのヒートアイランド対策研究は科学的視点から行われており、ここでは自己分野内のことしか考えられていない。例えば、道路分野では技術の良否が路面温度の測定値に基づいて比較される。また、日射反射性塗料では反射率で評価されるであろう。しかし、これらで例えば緑地化の効果と比較することはできない。重点投資型では、分野内技術情報ではなくて、分野間技術情報が必要となる。

2.5 対策推進のための技術情報と技術の評価

＜Q13＞ヒートアイランド対策技術では、いかなる分野間技術情報が好ましいのか？

＜A＞筆者らは、「大気への顕熱負荷」に注目すべきと考えており、これが今回の出版本の一つの重要な提案である。対策技術を「どれくらい顕熱負荷を低減するのか」で評価することにより、異分野間の相互比較が可能になる。もちろん、熱負荷は「さまざまな要因によって変化する物理量」「計測も容易ではない」など、サイエンスの立場からは問題となる指標かもしれない。しかし、総合エンジニアリングとして、最適対策を考えるときには、活用すべき指標と考えられる。

＜Q14＞大気熱負荷だと自然地でも発生しているが？

＜A＞出版本では、「大気熱負荷」と「ヒートアイランド熱負荷」の概念を区別している（出版本 p.15）。後者は対象地からの大気熱負荷と自然地からの大気熱負荷の差で定義するものである。自然地としては、出版本では「草地」を使っている。なお、対策技術の相互比較の場合は、相互の差が問題となる

ため、大気熱負荷で考えても問題はないと考えられる。なお、よくヒートアイランドの主要原因を議論するときに、人工排熱と地表面熱が比較される。このときは、後者に対してはヒートアイランド熱負荷で考えるべきである。

<Q15>大気熱負荷は計測がむづかしい。また、気象条件にも依存する。この点はいかに考えるのか？

<A>その通りである。筆者らは計算モデルをしかるべき機関で決定し、必要となるパラメータを決める。また、同時に計算に使う気象条件も決定する。各技術の大気熱負荷量は計算から求めるのが妥当と考えている。各技術のパラメータは、実測結果から同定することになるであろう。これらの手続きは、当然信頼のある方法や機関が行うべきであろう。

2.6 大気熱負荷をベース情報とする対策体系

<Q16>大気熱負荷は技術の評価以外に、対策計画推進に対しての使い方はあるのか？

<A>出版本での関連する提案は、技術の評価も含んで、「大気熱負荷をベース情報とする定量的対策体系の構築」である。たとえば、ある建築や地区（建築等と表現する）の開発をするときに、「通常設計よりも〇〇W/m²の大気熱負荷の削減」などを設計要件に加える。もちろん、これは既築物件にも適用でき、大気熱負荷の多い建築等では散水などの行動をとらせることも可能である。また、現在の自治体のヒートアイランド対策計画では、目標が立てられていることも多い。例えば、「〇〇年までに昇温を止める」「熱帯夜日数の〇〇%の削減」などである。これらはたいてい「気温目標」である。しかし、これを達成するのに、各セクターは「一体どこまで協力すべきか」「自分は是正すべき問題ある生活や活動をしているのか」などに関する情報が全くない。出版本では、気温目標を「熱負荷削減目標」に翻訳し直すことを提案している。また、その削減熱負荷の地域内での分配方法についても考察している（出版本 p.175 など）。

<Q17>大気熱負荷の計算プログラムが必要になるであろうが、それは存在するのか？

<A>空調熱負荷計算は広く普及している。このような熱負荷予測プログラムを大気熱負荷に対して行うプログラムがあれば有力である。現在、大阪ヒートアイランド対策技術コンソシアム(大阪 HITEC)では、上述の位置づけの下で、建築等の大気熱負荷計算プログラムを開発してきた。現在、プロトタイプ（名称は未定）を開発しており、近くモニターを募集して試用してもらう予定である。このプログラムは、いろいろな構成要素の大気熱負荷発生量をデータベースとして保有しており、それらを積算する構造である。個別の対策技術の大気熱負荷情報を追加登録すれば、その技術適用時のパフォーマンスが評価できる。建築等の開発時にそれらの技術が俎上に上り、よい技術の普及につながると考えられる。なお、この追加登録には、大阪 HITEC の認証が要件となるであろう。

<Q18>一般市民もヒートアイランドに何らかの貢献をしてもらうべきと思うが？

<A>地球温暖化に関しては多くの対策研究がなされて、市民の活動目標も明確な定量値が示されている。たとえば、政府が呼び掛けている「1人1日に1kgの二酸化炭素の削減」がそれである。これは、環境負荷である二酸化炭素の排出構造が単純であり、電力・ガス・石油の消費量から簡単に計算できるからである。一方、ヒートアイランドの負荷である熱発生量は、太陽熱起源と生活支援エネルギーの排熱からなり、顕熱・潜熱の区別も必要であるなど、推定がきわめて難しい。これには上述の「建築等の大気熱負荷計算プログラム」の簡易版を用意して、「環境負荷の見える化」をするとともに、適切な行動目標を示さねばならない。これにより市民が、自分の状況を把握でき、活動に参加することができるであろう。これは難しいが、問題解決にはきわめて重要な課題である。

＜Q19＞大気熱負荷による評価等の問題点は何か？

＜A＞大きな問題点は、「熱負荷削減対策」はヒートアイランド対策のすべてをカバーしていない点である。ヒートアイランドの原因には、少なくとも「熱負荷増加型」と「拡散悪化型」がある。後者の例としては、アーバンキャニオン化などの建築等による風のブロックがある。これに関する対策は大気熱負荷では評価できない。この点に対しては、「熱負荷削減対策」と「拡散改善型対策」は別枠で評価して。最終的には両評価手法結果を合わせて総合評価されることになる。

2.7 ヒートアイランド解決をリードするのは建築熱環境技術者

＜Q20＞ヒートアイランド対策推進のリーダーシップをとるのはどのような技術者か？

＜A＞上述のような「大気熱負荷をベース情報とする対策体系」の下では、熱負荷を扱える技術者がリーダーシップをとるのに最もふさわしいと考えられる。いままでの環境技術の枠組では、「土木環境技術者は公的環境担当」「建築技術者は私的環境担当」と明確であった。しかし、土木環境技術には熱負荷に関する知の蓄積は全く存在しない。これからの最重要課題ともいえる温暖化問題（地球温暖化、ヒートアイランド）という公的環境問題に対しては、建築環境技術者が解決能力をもっている。これは、環境技術のパラダイムシフトともいべき大きな枠組の変化である。建築環境技術者は、温暖化問題が大きな地位向上のチャンスであり、しっかりとそれを掴むべきである。

＜Q21＞ヒートアイランド対策技術の開発方向への視点は？

＜A＞やや繰り返しになるが、いままでは建築環境技術者は建築内空間という私的環境に対して私的効用を、土木環境技術者は公的空間に対して公的効用を生み出す技術者であった。そして、前者は施主からの私的資金で、後者は社会からの公的資金で仕事をしてきた。しかし、今や建築技術者は私的効用のみならず、公的効用も実現できる存在である。筋論では、前者は施主が、後者は社会が負担すべきものである。この体制を実現するには、業界を挙げての戦略的活動が必要である。この活動の支援のためにも、技術者は自からが生み出す効用を私的と公的に区別して明確にするべきである。なお、地球温暖化対策に公的資金を使うのは市民権を得つつあるが、残念ながらヒートアイランドは遅れている。したがって、ヒートアイランド対策は、公的効用だけで仕事を進めるのはきわめて困難である。この問題を考えると、ヒートアイランド対策は私的効用と公的効用の両者を生み出すものであることが望ましい。また、「地球温暖化への寄与と抱き合わせ」にするのも重要なキーワードである。

＜Q22＞技術が生み出す公的効用と私的効用について具体例を示して欲しい？

＜A＞例として屋上に塗る反射性塗料を考えると、日射の反射で屋根の温度が低下できる。すると、冷房負荷が減少して電力消費が削減できる。ここで、電気代の削減という私的効用が生まれる。また電力削減により二酸化炭素排出が減るといふ公的効用が生まれる。また、屋根温度の低下によって、大気への顕熱負荷が減る。これも公的効用である。

2.8 空間スケールと熱環境技術の関与すべき対象

＜Q23＞ヒートアイランド対策のターゲットとして、例えば「熱帯夜の削減」と「クールスポットを創出」などはスケールの違うものである。空間スケールについてどう考えたらよいのか？

＜A＞出版本では「マクロなヒートアイランド問題」と「ミクロなヒートアイランド問題」と区別するのがよいことを述べている。前者は都市大気ドームの気温上昇、後者はアーバンキャニオン内のようなミクロ気候の熱環境の悪化である。熱帯夜の削減は前者の、クールスポットの創出は後者に関する課題である。直接的な空間デザインの対象は後者であり、前者は空間デザインや都市システムデザインが負荷をかけないようにする対象である。これは、建築デザインで地球温暖化に配慮するような

関係である。下表に「空間のスケール分け」と「熱環境技術の関与や寄与」との関係を整理している。ここでの提案は、③④の空間に対して「新しい対象（右から2列目）」を熱環境技術が積極的にエンジニアリングの対象としていくこと、そして、⑤の空間に対して「熱負荷をかけない」ような空間デザインやシステムデザインを行っていくことである。備考に示すように、前者が「マイクロなヒートアイランド対策」、後者が「マクロなヒートアイランド対策」となる。さらに詳細の説明は出版本を参照いただきたい（出版本 p.131）。

番号	管理区分	スケール	対策対象	例	熱環境技術の関与や寄与	備考	
①	私的空間	建築内空間	空調空間		今までの対象		
②			非空調空間		同上		
③	公的空間	都市空間	敷地内空間	庭園・公開空地・屋上など	新しい対象	マイクロなヒートアイランド対策	
④				マイクロ公共空間（街区）			アーバンキヤニオン
							公園
							運動場
						
⑤			マクロ公共空間（都市）	都市大気ドーム	熱負荷をかけない対象	マクロなヒートアイランド対策	
⑥		地域空間					
⑦		地球空間			CO2負荷をかけない対象		

<Q24> ヒートアイランド問題の階層性と空間デザインの方向は？

<A> マイクロなヒートアイランド問題の緩和は、一部の例外を除いて、一般にマクロなヒートアイランドに寄与する。したがって、「クールスポットの創出などにより人々を戸外に引き出す」ようなマイクロなヒートアイランド問題の解決をターゲットとした空間デザインを推進すべきである。これにはこのような空間デザインの重要性に対する社会の合意形成が重要である。いままでの熱環境技術は、室内のみを対象としてきたのに対して、屋外熱環境を明確なデザイン対象と位置づけ、設計支援手法の高度化などが必要である。

2.9 ヒートアイランド緩和のターゲット

<Q25> ヒートアイランドは対処すべき環境問題か？

<A> 先述したように、ヒートアイランド問題は、暑熱環境が問題になるような地方における都市のつくり方の根本的欠陥の表れである。これは放置してよい問題ではあり得ない。正しい都市に向けて対策を講じるのは、必須の課題である。よく、気温上昇による悪影響と対策経費との費用対効果が、対策を講じるのかどうかの視点から議論されるが、これは、対策の緊急度を決定するものと考えべきであろう。長期的には確実に対処すべき問題である。

<Q26> ヒートアイランド問題の何をターゲットに解決を図るのか？

<A> 空間的ターゲットとして、垂直方向には地表付近の気温の緩和を、水平方向には都市域全体とする。都心部を放置する DID のような対応（出版本 p.6 コラム4）もあるが、ここではそのような策は

取り上げない。デザインの対象としてはマイクロなヒートアイランド問題を、マクロなヒートアイランド問題は、都市システムからの負荷を低減する空間として位置付ける。時間的ターゲットとしては、マクロなヒートアイランド問題に対しては、夕方から夜間をターゲットとする。マイクロなヒートアイランド問題に対しては、人が戸外活動を行う日中から夕方をターゲットとする。また季節的には、夏季をターゲットとする。また、熱環境要素のターゲットとしては、気温を最重要視するが、マイクロなヒートアイランド問題では、体感温度をターゲットとする。(出版本 p. 47)

3. あとがき

以上述べたように、対策計画の研究は緒についたところである。したがって、かなり私見の入った記述となった点をお断りする。本稿をきっかけに、各位にはさらに考察を深めていただければ幸いである。