

ヒートアイランド現象による環境影響に関する調査報告書(概要)

- 環境省環境管理局大気生活環境室 -

1 ヒートアイランド現象とは

ヒートアイランド現象とは、都市化による地表面被覆の人工化（建物やアスファルト舗装面などの増加）やエネルギー消費に伴う人工排熱（建物空調や自動車の走行、工場の生産活動などに伴う排熱）の増加により、地表面の熱収支が変化して引き起こされる熱大気汚染であり、都心部の気温が郊外に比べて島状に高くなる現象をいいます。

ヒートアイランド現象を形成する要素には、地表面被覆が変化することによる反射や放射の変化、地表面と大気間の対流顕熱や蒸発潜熱の変化、人口や産業が集中することによる人工排熱の増加やその放出の仕方、都市をとりまく海陸風などの気候条件など多くの要素が絡み合っています。

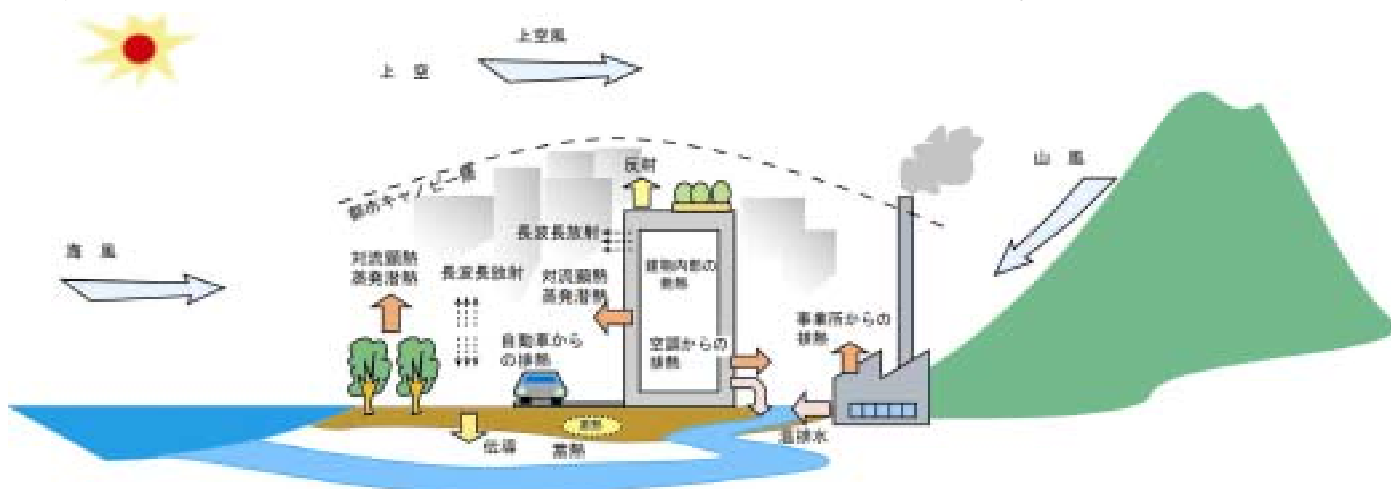


図1 ヒートアイランド現象に係る要素 注)対流顕熱、蒸発潜熱の説明はP.10を参照のこと

2 検討対象スケール

ヒートアイランド現象やその対策を検討する場合、対象とするスケールの大きさが重要となります。ヒートアイランド現象そのものは当該都市の全体が覆われる5～50万分の1スケールで把握されるものですが、その対策を検討する場合にはスケールの大きい都市形態の改変から地表面被覆の改善、人工排熱の削減など5百分の1以下の非常に細かいスケールにまで議論が及びます。この調査ではスケールを4つに分け、そのうち第1、第2階層を中心に検討を行いました。

階層	スケールの目安	検討の視点	指標
1	1/500,000～ 1/50,000	都市全体のヒートアイランド現象が捉えられる 都市全体の形態	都市と郊外の気温差 風向風速
2	1/30,000～ 1/3,000	熱的・気候的特性によって等質な地域がゾーニングできる 都市計画等	気温分布 大気熱負荷量
3	1/2,500～ 1/1,000	局地的な高温化、通風阻害など問題箇所を指摘できる 地区総合計画等	局地的な気温分布 局地的な風向風速
4	1/500～1	個々の建物周辺で体感的な熱環境の問題を指摘できる 建物計画等	体感指標

日本全体では地球温暖化によると考えられる気温上昇が 100 年間で約 1 (平均気温) であるのに対し、東京の平均気温は約 3 上昇しています。また、東京の日最高気温の年平均値は同期間で約 2 上昇しているのに対し、日最低気温の年平均値は約 4 上昇しています。

上昇幅の大きい日最低気温で、東京都心部(大手町)と周辺都市(横浜、熊谷、宇都宮、銚子)のここ 100 年間の変化を比較しました(図 2)。周辺都市の上昇が 2 前後であるのに対し、東京都心部はその 2 倍の勢いで上昇しており、関東平野の都市の最低気温が上昇する中でも東京都心部のヒートアイランド現象が顕著になっています。

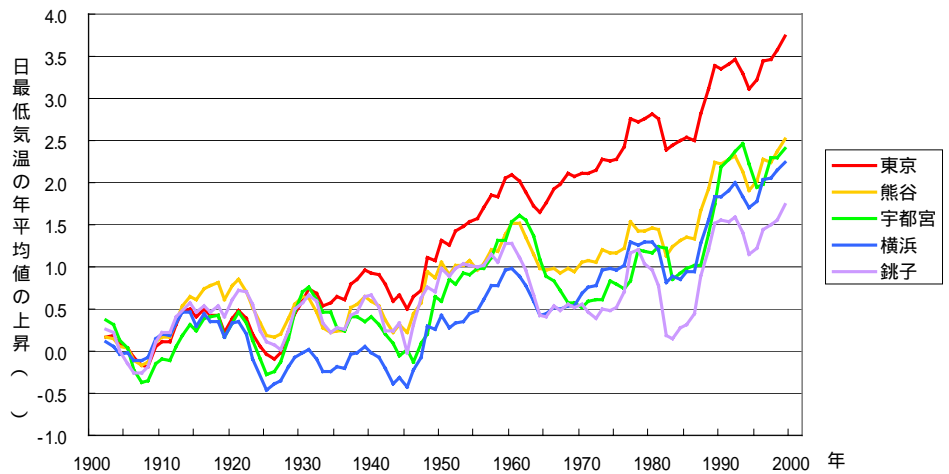


図 2 東京と周辺部の日最低気温の年平均値の変化(5年移動平均)

出典)気象庁年報 2001 より作成

注)1900 年から 1909 年の 10 年間の平均値を基準として基準値からの上昇分を示した。

ヒートアイランド現象による都心部の高温化は、熱中症の増加や桜の開花時期の変化などにその影響が現れていることが本調査でわかりました。図 3 は東京都内の 1984 年～2001 年の夏季(7月～9月)における高温及び日射病による搬送人員数と各年の 30 以上時間数との関係を表したものです。これを見ると、30 以上時間数が増えると搬送人員数も増える関係にあることがわかります。

エネルギー消費の面では夏季の冷房使用による電力エネルギーのピーク需要が増加し、都市全体のエネルギー効率の低下やそれに伴う CO₂ の排出量の増大が懸念されます。(東京電力管内(1都8県)では、気温が 1 上昇することにより最大電力は 160 万 kW 増加するといわれます)

また、ヒートアイランド現象が都市の大気汚染を助長しているという指摘があります。冬季は、ヒートアイランド現象が顕著な日に都心部の窒素酸化物濃度の上昇が認められました。これは冬季の夜間から朝方にかけて都市の上空に逆転層(上空に行くに従い気温が上昇する大気層)が形成され、これにより蓋をされたダストドーム状の混合層が形成されるため、都市内で排出された大気汚染物質の拡散が阻害されていると考えられます。また、夏季の光化学オキシダントによる広域大気汚染に都市のヒートアイランド現象が関与していることも疑われます。

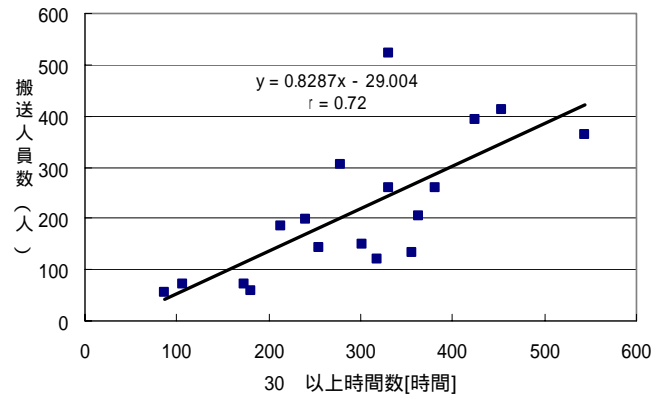


図 3 搬送人員数と 30 以上時間数との関係

出典)東京消防庁資料、気象庁アメダス観測年報

5 ヒートアイランド現象の要因

都市化が進むにつれ、建物や道路が整備されることにより自然的な被覆が減少し、ライフスタイルの変化や情報化社会の到来などとあいまって都市に多くのエネルギーが投入され、人工排熱が増加しています。これら地表面被覆の変化と人工排熱の増加がヒートアイランド現象を促進しています。

【地表面被覆の変化】

緑地や水面の気温低減効果や周辺に冷涼な気流を供給する機能は、多くの観測結果で明らかにされています。緑を含む自然的被覆を、東京の都市開発が本格化する以前の状況（1930年代）と現況で比較しました（図4）。1930年代には東京23区平均で70%以上を占めていた裸地や草地は現況では40%以下となっており、これが対流顕熱の増加につながっています。

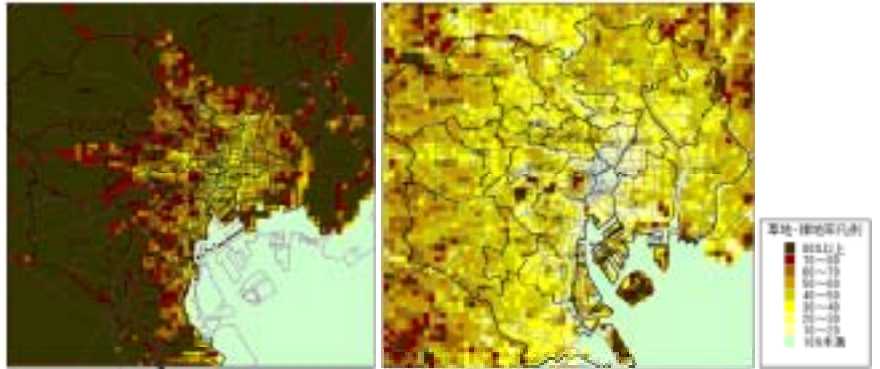


図4 裸地・草地分布の変化 左:1930年、右:現況

また、アスファルトなどの人工的被覆は熱容量が大きく、昼間に日射を受けて蓄えた熱を夜間に放出するため、夜間の気温を上昇させる一因となっています。

【人工排熱の増大】

人工排熱には、空調など建物に起因して発生する建物排熱、自動車の走行に伴う自動車排熱、工場などの生産活動に伴うエネルギー消費によって生ずる工場排熱などがあります。東京23区全体で見ると建物排熱が約50%を占め、自動車排熱が約40%、工場排熱が約10%を占めています。

図5は日平均の人工排熱（顕熱+潜熱）の分布を示したものです。東京23区の人工排熱の平均値は $31\text{W}/\text{m}^2$ で、これは東京の8月における平均全天日射量の18%に相当します。また、都心3区や池袋、新宿、渋谷といった商業業務施設が集積した地区では $100\text{W}/\text{m}^2$ を超えており、中には $200\text{W}/\text{m}^2$ を超えるようなところも見られ、ヒートアイランド現象に少なからず寄与しているものと考えられます。



図5 日平均の人工排熱の分布

6 都市の形態

都市におけるヒートアイランド現象の抑制には、対流顕熱や人工排熱（顕熱）を削減することと同時に、暖められた大気を効率的に換気し、都市内の気温を上昇させないことも重要です。多くの高層建物が密集しているところでは通風を阻害したり、夜間の放射冷却を妨げることが知られています。

中長期的には大気熱負荷量が多い地域を中心に、対流顕熱と人工排熱（顕熱）を抑制するよう配慮するとともに、地域の風の流れを考慮し、また、緑を確保するなど、快適な都市環境の形成が求められます。

7 熱環境から見た都市の気候解析

現象としての気象（気温、風速など）、要因としての地表面被覆や大気熱負荷量の分布などを、目的に応じて地図上で重ね合わせることで、検討すべき問題が見えてきます。例えば、熱帯夜日数の最も多い地区は東京でいえば大手町などの都心部ですが、影響を受ける夜間人口の多くは周辺部に移っています（図6）。熱帯夜の緩和に向けた対策を効果的に行うには、夜間の熱負荷の発生量が多い都心部のみでなく、周辺の住宅地などにも積極的に対策を講じる必要があります。

その際、有効となるのが下のような気候解析図です。ここでは例として夜間（22:00）における大気熱負荷量（顕熱）の多い地区を風況などとともに示して

います。これらを重ね合わせて見ることで高温暴露人口が多く熱負荷の高い地区から対策を講じることが効果的と考えられます。

すなわち問題の明確化とこれに対処するための基礎情報の解析により、ヒートアイランド対策の課題を明確にすることができます。

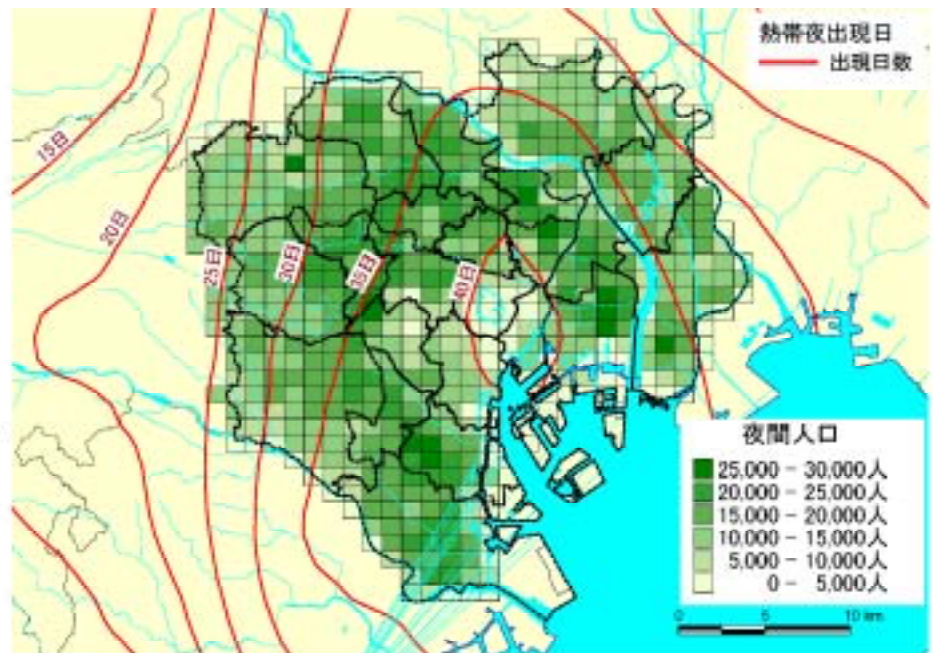


図6 夜間における熱環境問題図の例(H7国勢調査、大気常時監視の気温データ)
注)人口のデータは東京23区のみ表示

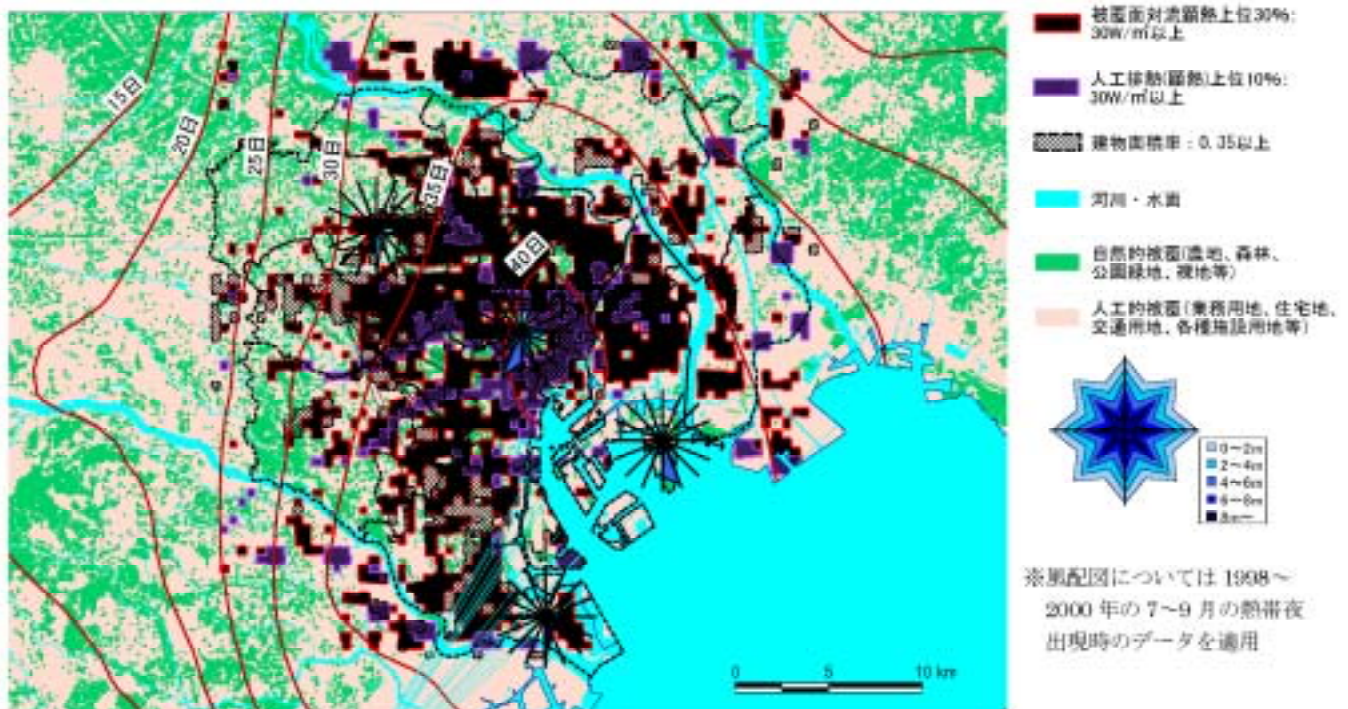


図7 夜間(22時)を対象とした気候解析図の例

ヒートアイランド対策は、人工的な地表面被覆の改善、省エネルギーや新エネルギーの活用による人工排熱の削減、中長期的には都市内に放出される熱を効果的に発散できる都市形態の構築の3つに大きく分けることができます。本調査では東京23区を対象に、夏季における「熱帯夜の削減」と「昼間の高温化の緩和」を目標とし、都市の建物形状の改変を伴わない短期的な対策として、地表面被覆の改善と人工排熱の削減を中心に、独立行政法人建築研究所の足永氏らにより開発されたUCSS^注)を用いて詳細及び簡易シミュレーションを行い、効果的なヒートアイランド対策のあり方について検討しました。

STEP 1

現況の把握(ヒートアイランド現象の把握)

図8は、UCSSの詳細シミュレーションシステムにより東京23区の現況と1930年代の大気熱負荷量の日変化を見たものです。現況は1930年に比べ、昼間(7:00~18:00)の大気熱負荷量(顕熱)が約50%増加しています。また、夜間(19:00~6:00)の大気熱負荷量(顕熱)は約5倍に増加しています。

増加要因を区別に分けると(日平均)千代田区などの都心部では増加分の80%程度が人工排熱(顕熱)ですが、世田谷区など住宅用途の多い地区では、増加分の60%以上が地表面被覆の人工化による対流顕熱となっています。

STEP 2

要因から見た都市の類型化

ヒートアイランド対策を効率的に進めるには、「どこ」に「どのような施策」を行うかが問題となります。施策によっては適用可能な場所が限定されたり、また目標や地域によって効果の高い施策にも違いがあるものと考えられます。

本調査では、東京23区を土地利用、建物用途により、水辺エリア、人工被覆エリア、住宅エリア、業務系エリア、住宅と業務系の建物が混在している混合エリアの5つに分類し、さらに建物の建て詰め状況などから住宅、業務系、混合エリアをそれぞれ2つに分類し、合計8つの地区に分類しました。

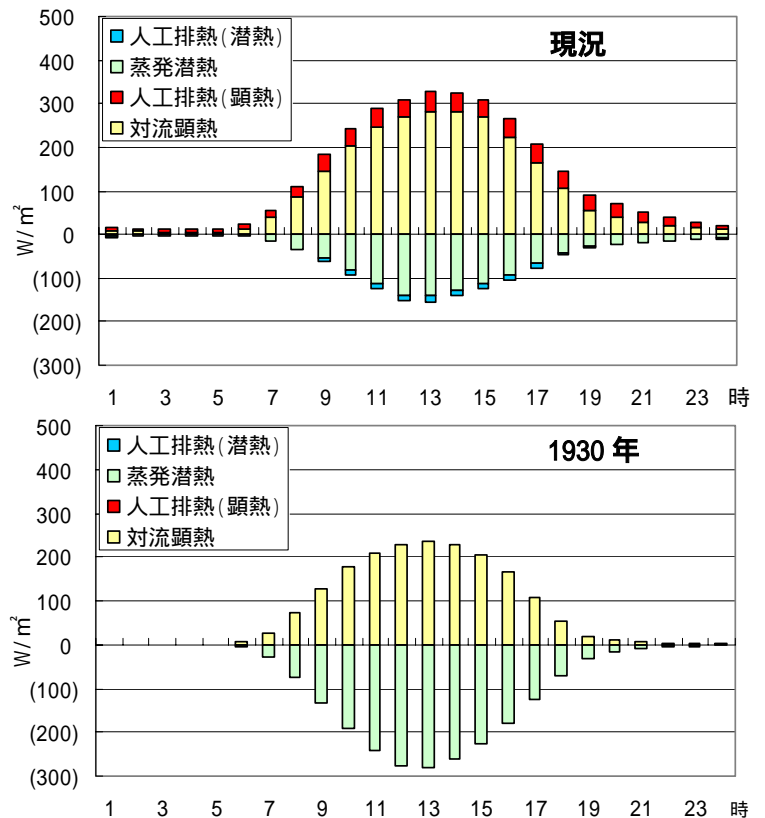


図8 東京23区の1930年と現況の大気熱負荷量

注) UCSSとは、都市気候予測システム(Urban Climate Simulation System)の略称であり、都市気候シミュレーションプログラムを都市GIS(地理情報システム)と合わせてシステム化したものである。本調査では、このUCSSを用いて2種類のシミュレーションシステムを開発し、対策の検討などに活用した。

詳細シミュレーションシステム:各メッシュに対応したデータを入力し、これらを総合化して各メッシュごとの大気熱負荷量や気温等を予測する。本調査では東京23区を500mメッシュ(64×64)に分けて計算を行った。(所要時間:1週間/ケース)

簡易シミュレーションシステム:メッシュに同じデータを入力(つまり同じ形態の町が連続していると仮定)し、その中の1つのメッシュについて大気熱負荷量や気温を予測する。モデルの感度分析を目的として開発されたシステムで、比較的短時間で結果を得ることができる。(所要時間:5時間/ケース)

STEP 3

各類型の熱特性の把握と対策地区の抽出

各地区の熱特性を見ると、舗装や建物などにより地表面被覆の人工化が進んでいる地区ほど対流顕熱が多く放出されていることが分かりました。また、業務系や混合エリアでは、冷房使用などにより人工排熱が多くなっています。本調査の検討では次のような視点から対策地区を抽出しました。

目標	住宅系エリア	業務系エリア
熱帯夜の削減	夜間対流顕熱の削減	夜間人工排熱の削減
昼間の高温化の緩和	昼間対流顕熱の削減	昼間人工排熱の削減 昼間対流顕熱の削減

その結果、熱帯夜対策が重要で対流顕熱の多い「住宅密集地区」、昼間の人工排熱が多い「業務系高容積地区」、住宅・業務両地区の特徴を持った「混合密集地区」の3つを対策地区としました。

面積にすると、住宅密集地区は東京 23 区の約 20%、業務系高容積地区と混合密集地区は各 10% 程度で、対策対象地区の合計面積は東京 23 区の面積の約 40% に該当します。

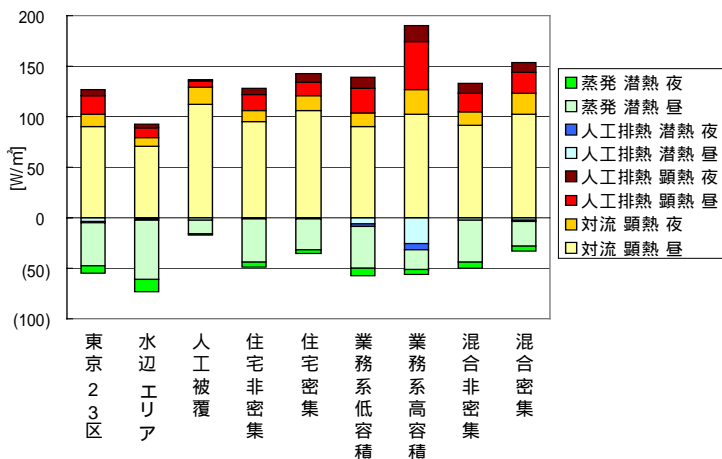


図9 大気熱負荷量の比較

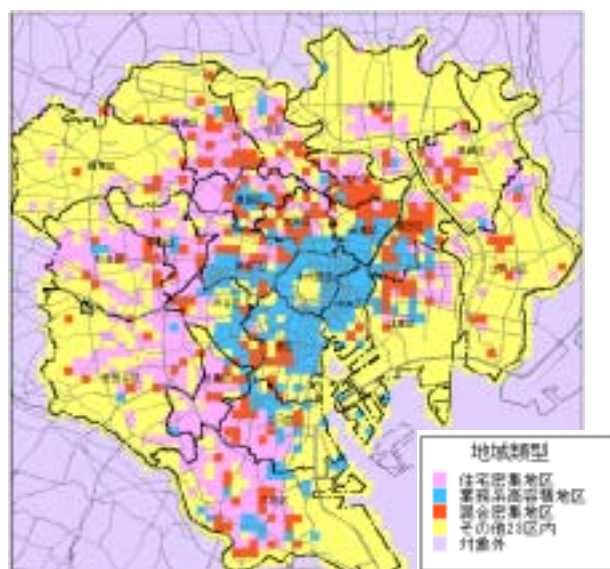


図10 対策対象地区

STEP 4

施策の検討

ヒートアイランド対策には「地表面被覆の改善」、「人工排熱の低減」、「都市形態の改善」に資する様々な施策があります。各施策にはそれぞれの特徴があり、その効果や実現可能性などを検討し、対策を効率的に進める必要があります。例えば地表面被覆の改善としては自然的な地覆化の推進など、人工排熱の低減としては省エネルギーの推進などがあります。本調査では次のような対策項目を中心に検討を進めました。

目標	住宅系エリア	業務系エリア
熱帯夜の削減	自然的な地覆化の推進	夜間エネルギー消費の削減
昼間の高温化の緩和		省エネルギー等による人工排熱削減、植樹、屋上緑化などの推進

熱帯夜対策が重要な住宅密集地区では、アスファルトなどに比べ昼間に蓄えられる熱が減少し、夜間に放出される対流顕熱が減少する自然的な地覆化などが有効と考えられます。この対策は、昼間の対流顕熱の削減にも有効です。昼夜ともに人工排熱の多い業務系高容積地区では、都市へのエネルギー投入を削減する省エネルギー等の推進が重要です。植樹は、地上に到達する日射を遮り、蒸発潜熱を放出するとともに木陰を作り、昼間の屋外環境の快適性を向上させる効果を持ち、屋上緑化などの建物緑化は、昼間の建物表面からの対流顕熱を抑制し、特に屋上緑化は断熱効果により最上階の室内温度の低減に寄与します。

STEP5

施策効果の検証

対策地区ごとに対策を実施した場合と、3つの対策地区で同時に対策を実施した場合の合計4ケース（右上段表）の詳細シミュレーションを行いました。

住宅密集地区では夜間の気温低減に寄与する自然的地覆化などを主体とし、業務系高容積地区では人工排熱の削減に結びつく省エネ、植樹や屋上緑化などを組み合わせた対策を設定しました。これにより例えば全地区対策では東京23区の面積（2,667メッシュ：66,675ha）の3.8%（現況の樹木面積率は6.5%）を植樹することになります。

対策効果を見ると（右中段表）東京23区全体で最低気温25未満となるメッシュ数は18%増加し、30以上時間数（メッシュ数×時間数）は16%減少し、熱帯夜や昼間の高温化が緩和されることがわかります。

気温の低減効果を見ると（図11）全地区対策で最大0.3程度の気温低下（13:00）が見られました。昼間の気温が低下した業務地区では冷房需要の減少、夜間の気温が低下した住宅地区では寝苦しみの緩和が期待されます。

また、対策を施さなかった地区（東京23区の60%）にも気温低下が見られ、熱的に問題のある地区を把握し、これらの地区の熱環境を順次改善することにより、周辺地区でも対策の波及効果が期待できるとわかりました。

表 対策内容

対策ケース	対策対象地区	対象地区面積 (ha)	対策項目			
			自然的地覆面積 (増加分: ha)	樹木面積 (増加分: ha)	屋上緑化面積 (増加分: ha)	人工排熱削減率
住宅地区対策	住宅密集地区	13,950	1,199	698	-	-
業務地区対策	業務系高容積地区	6,825	839	1,170	627	20%カット
混合地区対策	混合密集地区	6,475	619	648	469	10%カット
全地区対策	住宅密集地区 業務系高容積地区 混合密集地区	27,250	2,657	2,516	1,096	上記各地区に準じる

表 全地区対策による東京23区全体の対策効果

対策指標	現況	全地区対策	対策効果
最低気温25未満となるメッシュ数	989	1,166	18%増加
30以上時間数（メッシュ数×時間数）	8,786	7,348	16%減少

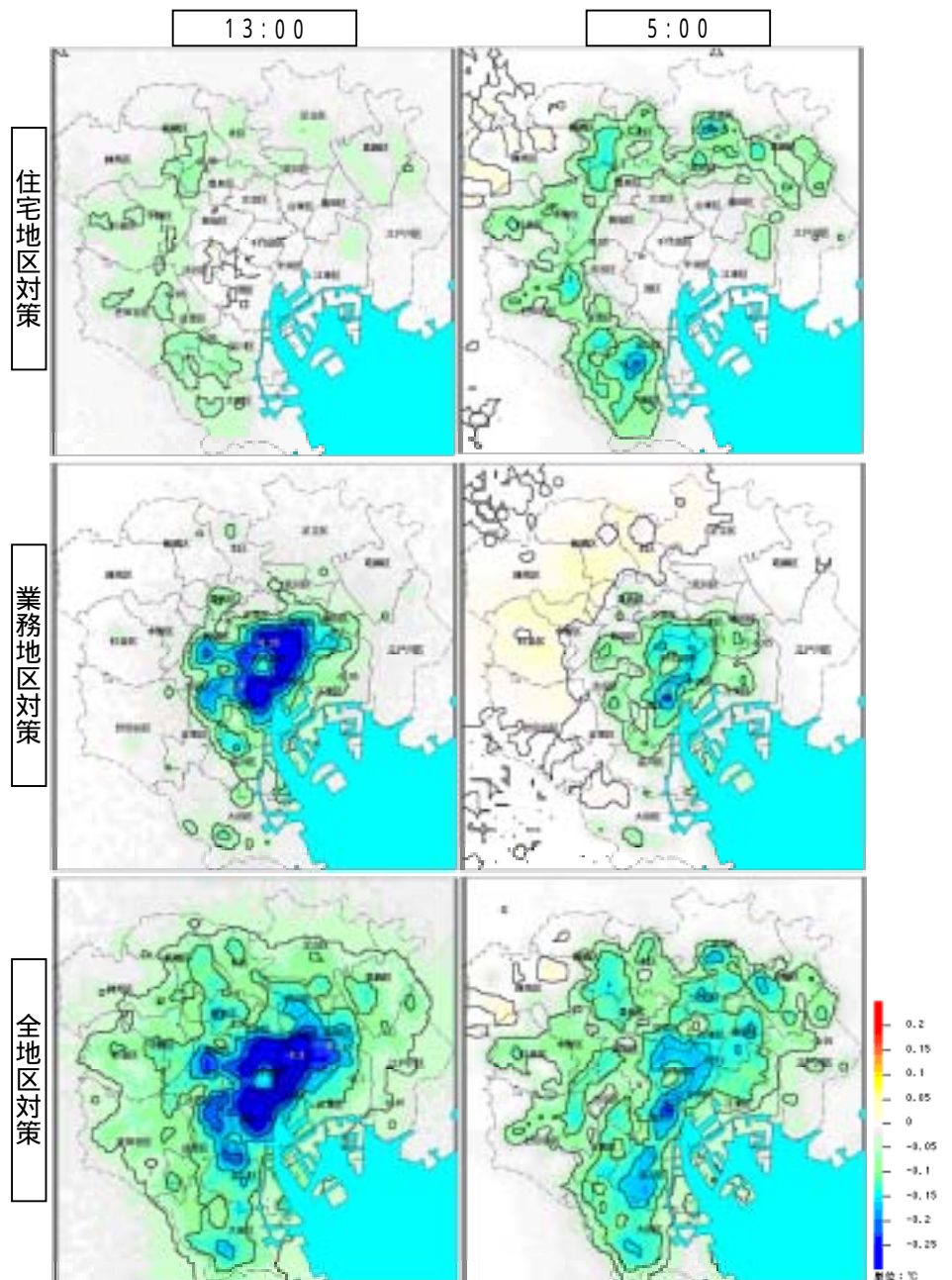


図11 地区ごとの対策による気温低減効果（現況 - 対策）

人為的な行為、すなわち地表面被覆の人工化や人工排熱の増加が、生活環境としての都市気候までも変化させるほど過大になってしまったのがヒートアイランド現象であり、今後は各要素を総合的に管理する必要性が生じています。つまり、ヒートアイランド対策は「熱」という視点で都市を捉え直し、地表面被覆の改善、人工排熱の削減や排出方法、風による熱の移流・拡散、熱の発生源やクールスポットの配置などの改善を通じて都市の熱を総合的、統一的に管理することです。

この都市の熱、すなわち大気熱環境と対策・施策を適切にコントロールするのが「都市の熱管理」です（図12）。

この熱管理の検討の基本的な流れを図13に示します。まず、対象となる都市で熱環境のバランス変化、その特徴的な現象としての熱帯夜の発生状況などを把握・評価します。次いで、現象と対策のスケールを整理して、対策のスケールに応じた密度のデータを気象、土地利用、人工排熱などの分野について収集あるいは推計します。こうしたデータは、同

じスケールの地図上に表して（基礎情報図）それらを重ね合わせることにより、気象や地表面被覆、人工排熱の関係を分析し、問題点の抽出や課題を見ることができます（考察図）。これらの一連の図を「都市環境気候図」と呼び、本調査では東京23区を例にこの試作を行いました。

一方、同じデータを用いて定量的に現況の熱収支や地区の熱特性、対策効果を把握するには数値シミュレーションが有効です。本調査ではUCSSをもとに詳細、簡易シミュレーションシステムを開発し、現況の再現、対策効果の検証を行いました。さらに、対策効果が簡便に把握できるように簡易計算システム（業務系、東京・大阪地区）を開発しました。

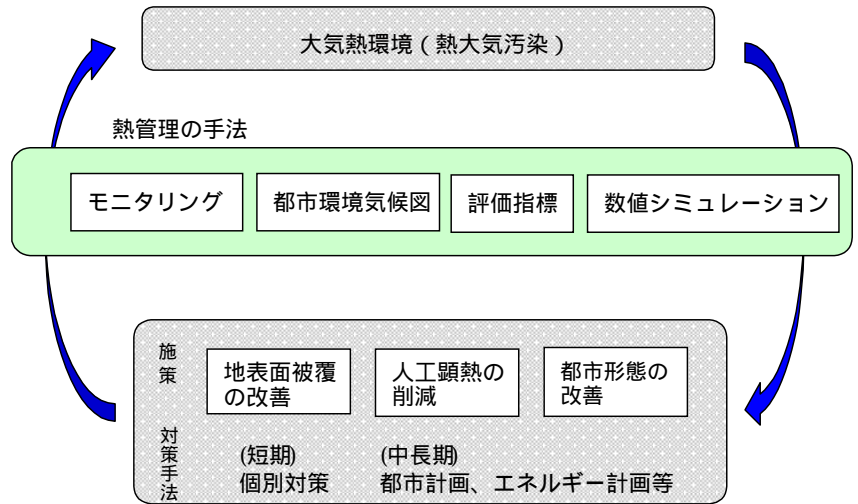


図12 都市の熱管理の概念図

じスケールの地図上に表して（基礎情報図）それらを重ね合わせることにより、気象や地表面被覆、人工排熱の関係を分析し、問題点の抽出や課題を見ることができます（考察図）。これらの一連の図を「都市環境気候図」と呼び、本調査では東京23区を例にこの試作を行いました。

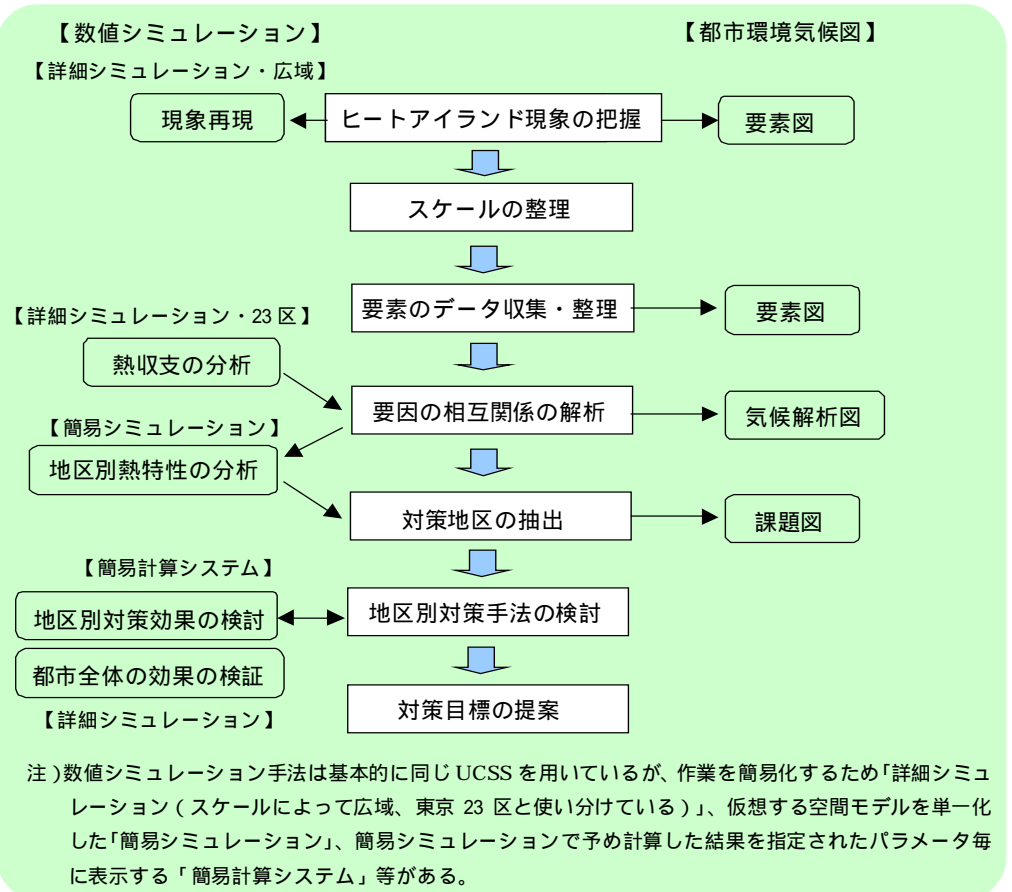


図13 都市の熱管理の流れ

これまでの調査で、ヒートアイランド対策に一通りの道筋が付けられたと考えていますが、今後も以下のような課題を検討していく必要があります。

1) 現象の解明

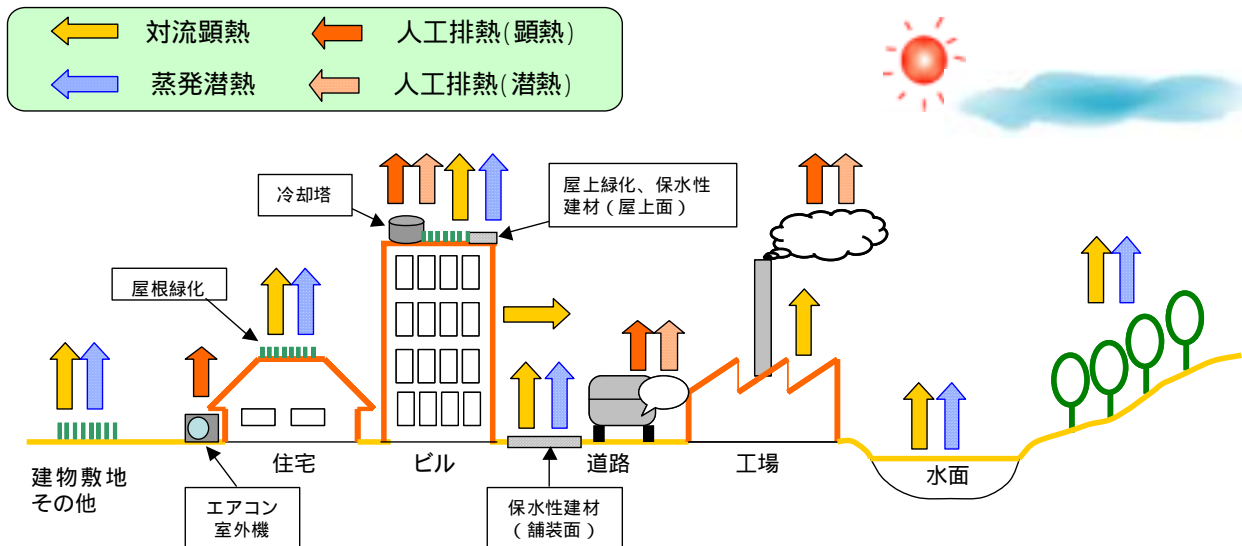
- ・都市全体の熱収支の評価（都市全体を1つのセルに見立て熱収支のバランスを評価する）
- ・大気汚染との関連性（大気汚染の高濃度化とヒートアイランド現象の関連性を明らかにする）

2) 管理の手段の開発

- ・全国各都市のモニタリングデータの蓄積（ヒートアイランド現象が把握・解析できる精度のデータ）
- ・評価指標の設定（各都市のヒートアイランド現象の進行状況を評価する指標など）

（本報告で取り扱っている「熱」についての補足説明）

本報告では、人工的なエネルギー消費による排熱や建物表面を含む地表面から地表面付近の大気に放出される熱、すなわち「大気熱負荷量」を主に取り扱っています。大気熱負荷量には、大気を直接暖める顕熱と水分の蒸発に伴う潜熱があります。この大気熱負荷量について、詳細を下図に示します。



対流顕熱	
(地表面)	: 建物敷地、道路、水面等の地表面から大気に放出される対流顕熱
(建物表面)	: ビル、住宅、工場建物等の建物表面(屋根・屋上面、壁面)から大気に放出される対流顕熱
(樹木)	: 樹木から大気に放出される対流顕熱
蒸発潜熱	
(地表面)	: 建物敷地、道路、水面等の地表面から大気に放出される蒸発潜熱
(建物表面)	: ビル、住宅、工場建物等の建物表面(屋根・屋上面、壁面)から大気に放出される蒸発潜熱
(樹木)	: 樹木から大気に放出される蒸発潜熱
人工排熱(顕熱)	: 建物、自動車、工場のエネルギー消費により大気に放出される人工排熱(顕熱)
人工排熱(潜熱)	: 建物、自動車、工場のエネルギー消費により大気に放出される人工排熱(潜熱)
大気熱負荷量(顕熱)	: 対流顕熱(地表面、建物表面、樹木) + 人工排熱(顕熱)
大気熱負荷量(潜熱)	: 蒸発潜熱(地表面、建物表面、樹木) + 人工排熱(潜熱)

対流顕熱：日射などにより地面や建物が暖められると高温の地表面から周囲の大気に熱が放出されます。この熱を対流顕熱と呼び、空調から排出される熱い空気や自動車の走行など、エネルギー消費に伴い放出される熱を本報告では人工排熱(顕熱)と呼びます。

蒸発潜熱：地面の温度が高くなると地面に含まれていた水分が大気中に蒸発します。この時、水分は蒸発に必要な熱を地面から奪いとります。この熱を蒸発潜熱と呼び、植物の蒸発散作用も蒸発潜熱の一つであり、水冷式の空調などから排出される水蒸気は本報告では人工排熱(潜熱)と呼びます。