１章　ヒートアイランド現象による環境影響

ヒートアイランド現象による環境影響に係る文献調査は、ヒトの健康への影響として、熱中症／睡眠阻害／感染症の３項目、エネルギー消費への影響として、昇温とエネルギー消費／ヒートアイランド対策のエネルギー消費削減効果の２項目、気象への影響として、集中豪雨／光化学オキシダントの２項目に分類し、それぞれ項目ごとに、既存研究で明らかになっている知見や最新の研究成果を取りまとめる。

表 1-1　ヒートアイランド現象による環境影響の文献調査の範囲

影響大項目	影響中項目	研究手法	文献番号
ヒトの健康	熱中症	熱中症発生の統計解析	1~7
		熱中症の病態解析	8~15
		WBGT 等の指標	16~23
		都市における暑熱解析	24~27
	睡眠阻害		28~33
	感染症		34~36
エネルギー消費	昇温とエネルギー消費		1~8
	ヒートアイランド対策のエネルギー消費削減効果		9~13
気象	集中豪雨	数値計算	1~5
		発生メカニズム解析	6~9
		気象データ解析	10~14
	大気汚染（光化学オキシダント）		15~27

なお、取りまとめる文献は、基本的に 2006 年以降発行のものを対象とした。2005 年以前の文献は、参考文献として、また、既存研究で明らかになっている知見として収集した。ただし、「気象」項目においては、集中豪雨に関する基礎的研究や、光化学オキシダントに関する研究が、2003、2004 年を中心に行われていることから、2000 年代前半に発行された文献も収集した。

巻末に、収集した文献の一覧表、文献概要を取りまとめた。本章で示した文献番号は、この文献一覧表および文献概要の文献番号と対応している。また、本章に含まれる図表は、図表が挿入されている該当文献より抜粋した。図表番号については、便宜的に本章における通し番号を付した。

文献調査とあわせて、各影響について、専門家よりヒアリングを行った。ヒアリング結果は、本文中で適宜紹介する。詳細は、巻末資料（１章）「ヒアリングシート」に付す。

１．１　ヒトの健康への影響

１）熱中症

ヒートアイランド現象が熱中症の発症等に及ぼす影響については、これまで主に熱中症救急搬送者数と日最高気温との関連を示すなど統計データを用いた研究が主であった。ただし、一部には熱中症発生の状況について性別、年代別、発症時の時間帯・行動・場所別等の分析が実施されており、どのような状況で熱中症が発生しやすいかといった知見が整理されている。

最近の研究は、これまでと同様な統計データを用いたものが多いが、救急搬送者数データだけでなく、救急車を使わずに自ら医療施設で受診した情報を扱うものや、人口動態統計死亡票を用いた死亡との関係を調べるものなど、熱中症の発症の全容を捉えようとするものが見られる。また、発生時の気象に関する様々な指標、例えば WBGT や日射量等と熱中症発症の関係を調べることなどで熱中症発症予測手法に関連する研究も見られる。

統計データではなく、より詳細にヒトが熱ストレスを受けた場合の生体反応を研究するものも見られる。運動時を対象として、発汗量や心拍数、皮膚温や深部体温、血液生化学の分析等により、ヒトの熱ストレスを定量化する研究や、暑熱環境下での歩行時の熱ストレスを皮膚温等で計測する研究等が見られる。

こうした人体の温熱整理に関する知見を活用するとともに、SET*や WBGT 等の暑さ指標について指標間の比較や指標の精緻化を図り、実際の都市におけるヒトの熱ストレスをモデル化し、数値計算により評価しようとする研究も見られる。

その他に、LCA 手法を用いた影響評価の取組みも見られる。

以下にそれぞれの分野における主要な研究成果の概要を整理した。

表 1-2　熱中症に関する対象文献の研究手法

影響項目	研究手法
熱中症	発生の統計解析
	病態解析
	WBGT 等の指標
	都市における暑熱解析

（１）熱中症発生の統計解析

全国の熱中症による死亡データ（1975～2007 年：5,877 人）を解析した結果では、平均 178 人／年、死亡率は 10 万人あたり 0.163 人／年であった。死亡率（年齢調整）は沖縄県が最も高く、鹿児島県、群馬県が続く。北海道や神奈川県、長野県では低くなっている。（文献１）

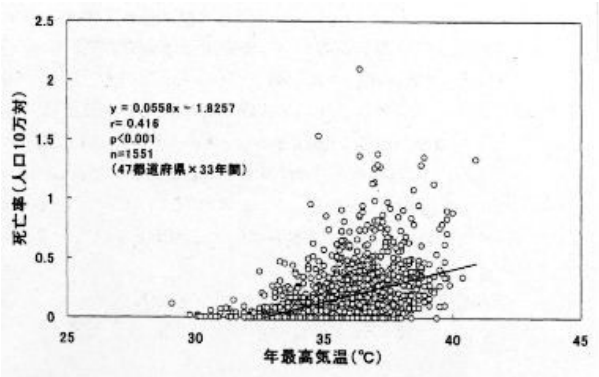

図 1-1　年最高気温と死亡率（文献１）

東京都の熱中症発生データ（2003～2007 年：4,132 人）を解析した結果では、発生率が 10 万人あたり 6.571 人／年、死亡率は 10 万人あたり 0.345 人／年であった。熱中症発生に及ぼす気象要因の影響を調べたところ、日最高気温時 WBGT≧28℃、全天日射量≧14MJ/㎡が熱中症発生数の増加に有意に関係していた。また当日の平均雲量≧8.0 では発生の危険性が有意に低かった。さらに日最高気温時 WBGT≧31℃で死亡数／発生数の比が高くなっていた。（文献２）

表 1-3　熱中症発生に及ぼす気象要因による影響の解析結果[1]（文献２）

		発生10人/日以上の日 単発・初日		発生10人/日以上の日 連続4日以上	
		オッズ比	95%信頼区間	オッズ比	95%信頼区間
当日・日最高気温時 WBGT	<28℃ ≧28℃	1.00 3.91	1.69 - 9.04	1.00 7.21	2.39 - 21.81
当日・降水量	<0mm ≧0mm	1.00 1.30	0.50 - 3.39	1.00 0.304	0.06 - 1.62
当日・全天日射量	<14.0MJ/㎡ ≧14.0MJ/㎡	1.00 14.10	3.02 - 65.97	1.00 1.78	0.46 - 6.67
当日・平均雲量	<8.0 ≧8.0	1.00 0.69	0.31 - 1.53	1.00 0.33	0.12 - 0.90
当日と前日の日最高気温時 WBGTの差	<±0 ≧±0	1.00 1.60	0.73 - 3.52	1.00 0.70	0.28 - 1.71
前3日間の日最高WBGTの平均値	<28℃ ≧28℃	1.00 1.04	0.43 - 2.52	1.00 7.33	2.68 - 20.10
前3日間の全天日射量の平均	<14.0MJ/㎡ ≧14.0MJ/㎡	1.00 0.39	0.19 - 0.82	1.00 15.44	1.95 - 122.33
当日と前3日間の日最高気温時WBGTの差	<±0 ≧±0	1.00 1.33	0.58 - 3.05	1.00 0.85	0.31 - 2.31

大阪市の熱中症搬送者データ（2001～2005 年：909 人）を解析した結果では、日最高気温 33℃以上では同じ気温帯でも 6 月から 9 月の順で日平均搬送者が少なくなっており、暑熱馴化が影響しているのではないかと考察している。（文献５）

[1] 表中のオッズ比とは、変数が 1 単位変化するときアウトカム（この場合熱中症）の起こりやすさが何倍変化するかを表わした数値であり、交絡変数の影響を除いて解析できる多重ロジスティック回帰分析の回帰係数の逆対数に等しい[木原雅子、木原正博監訳『医学的研究のための多変量解析』(メディカルサイエンスインターナショナル、2008 年 3 月)]。

（２）熱中症の病態解析

人体の温熱生理反応については、古くから実験等が行われているが、最近の研究では屋外の暑熱環境下で活動種別ごとにその反応を調べているものが多い。

運動時の研究事例では運動種別ごと気象条件ごとに発汗量を調べ、低強度の運動（野球、ウォーキング）では 400～600g/h の水分補給、高強度の運動（ハンドボール、エアロビクスダンス）では 500～1,200g/h の水分補給が望ましいとしている。（文献 12）

運動種別ごとの着衣量の違いに着目して深部体温に及ぼす影響を調査したところ、野球では運動終了時の深部体温の上昇が 1.2℃であったのに対し、サッカーでは 0.8℃であった。野球やアメリカンフットボールのように全身を覆うユニフォームを着用するスポーツでは、熱中症予防指針を 1 ランク厳しく適用することが必要と指摘している。（文献 14）

また、屋外の運動種目について、普段から暑熱下で運動している選手にくらべ、スタンド等で観戦する暑熱環境に馴化していない人の熱中症予防対策が重要と指摘している。（文献 8）

都市の様々な場所で WBGT 等を計測した例では、芝生面とくらべてコンクリート面上は乾球温度 2.5℃、湿球温度 1.3℃、黒球温度 3～7℃高く、WBGT 情報を利用する際には 1 ランク厳しく適用する必要があると指摘している。さらにコンクリート面上の地表面高さ別の WBGT を計測したところ、高さ 1.5m にくらべて高さ 1m で＋0.4℃、高さ 50cm で＋1.1℃、高さ 5cm では＋2.1℃高くなり、大人にくらべて地表面の近くなる乳幼児の暑熱暴露についてその影響が大きくなることを指摘している。（文献 14）

（３）WBGT 等の指標

モデル化に向けては、暑さ指標に関する研究とモデルを精緻化するための研究がある。

平均皮膚温や深部体温と暑さ感との関係を調べた研究では、平均皮膚温が 33.5℃あたりから暑さ感が上昇し、深部体温が上昇し始める臨界皮膚温 35.8℃を超えるあたりで「非常に暑い」と感じていた。深部体温（直腸温）が 37.8℃を超えると暑さ感が急激に上昇した。（文献 21）

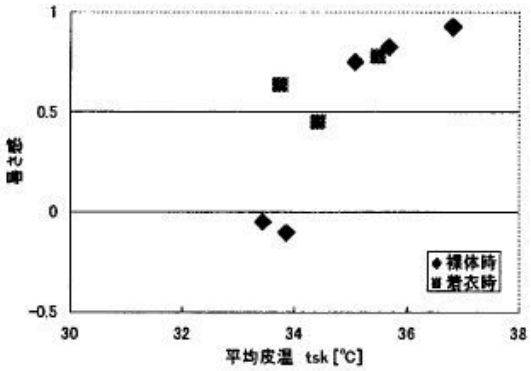

図 1-2　平均皮温と暑さ感の関係（文献 21）

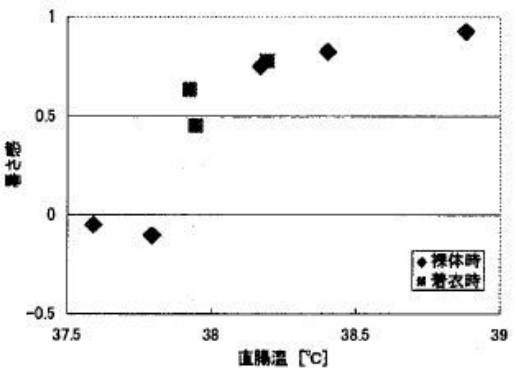

図 1-3　直腸温と暑さ感の関係（文献 21）

温熱感指標（SET*）と温熱感覚の関係を駅広場と公園で調べたところ、駅広場の快適感はSET*の快適域とほぼ一致するのに対し、公園の快適感はSET*の快適域より広いことがわかった。（文献22）

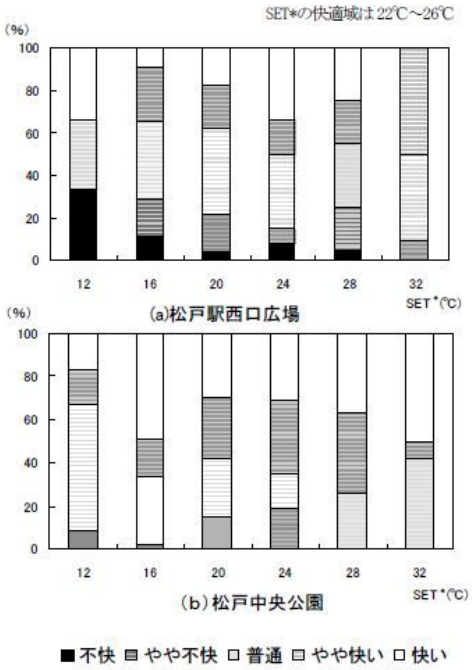

図 1-4　SET*と快適感との関係（文献22）

ただし、WBGT に関しては、もともと有効温度[2]を出すために作られた指標で、有効温度を出す実験が湿度 100%という条件の下で行われるために、皮膚がどのくらい濡れているかで値が異なってくるため、慎重に検討しなければならないという指摘もある（巻末資料（１章）「ヒアリングシート①」参照）。

その他、地球温暖化が進む将来の都市において、ヒートアイランド現象による気温上昇がWBGT を高める可能性があるとの指摘が聞かれた（巻末資料（１章）「ヒアリングシート⑥」参照）。

熱中症や熱ストレスの影響を障害調整生存年（DALY）[3]で評価した例では、気温 30℃超時間数が１時間増加するごとに、東京23区においては、0.243DALY の被害が発生する（2,360 千円に相当）。（文献20）

---

[2] 有効温度とは、「実在環境と同じ温熱感覚を与える相対湿度100%の無風の等温環境の気温」と定義され、気温、湿度、風速をパラメータとする有効温度線図が提案されている[『新版・快適な温熱環境のメカニズム』（空気調和・衛生工学会編、平成18年3月改訂第2版）]。

[3] 障害調整生存年（DALY）は、早死による生命損失年数（YLL）と障害による相当損失年数（YLD）の和と定義されるが、熱中症や熱ストレスの場合、YLD 変化の統計値が入手できないため、ここではYLL のみで評価している（文献20）。

DALY を用いて、人間の健康への影響は表されるが、その評価の枠組みは、LIME（Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling）という環境影響評価手法である。LIME については、全国１つの指標で評価を行っているため、粗い値がでることに批判があるが、被害算定額の絶対値に重要性があるのではなく、他の疾患との相対比較に意味がある。そのため、どのような環境影響が重要なのか、政策の切り口等を見極めるには有効ではないかとの話が聞かれた（巻末資料（１章）「ヒアリングシート③」参照）。

軽度の熱中症について、その回避に対する平均支払意志額で定量化した例では、東京都区部における夏場の不快感症状[4]を回避することに対する支払意志額は、約 320 億[円/月]となり、単純な比較は難しいが、2007 年の東京都区部の熱中症死亡数 82 人についてエンドポイントで評価した平均余命（47.8 年）を用いて、その損失を貨幣換算した額・約 380 億円[5]と比較すると、同程度の被害をもたらしていることが予想される。（文献 16）

（４）都市における暑熱解析

暑熱環境下での歩行を対象としてヒトの平均皮膚温を調べた研究では、曇天日が 31.6～34.5℃であったのに対し、晴天日は 34.8～36.4℃であった。また、晴天日に日向と緑陰で休憩した際の平均皮膚温の違いは最大で 2℃であった。（文献 24）

---

[4] 夏場の不快感症状とは、①だるさ・疲労感、②立ちくらみ・めまい・ふらつき、③無気力・いらいら、④熱っぽさ、⑤食欲不振、⑥むくみ、⑦下痢・便秘、⑧寝苦しさの 8 項目であり、このような症状は、疾患として認められていないため、被害額の算定に支払意思額を用いている（文献 16）。

[5] エンドポイントで評価した東京都区部における熱中症死亡の場合の平均余命（47.8 年）と LIME にある 1 DALY 損失回避に伴う支払い意志額（970 万円／DALY）を用いて貨幣換算した結果（文献 16）。

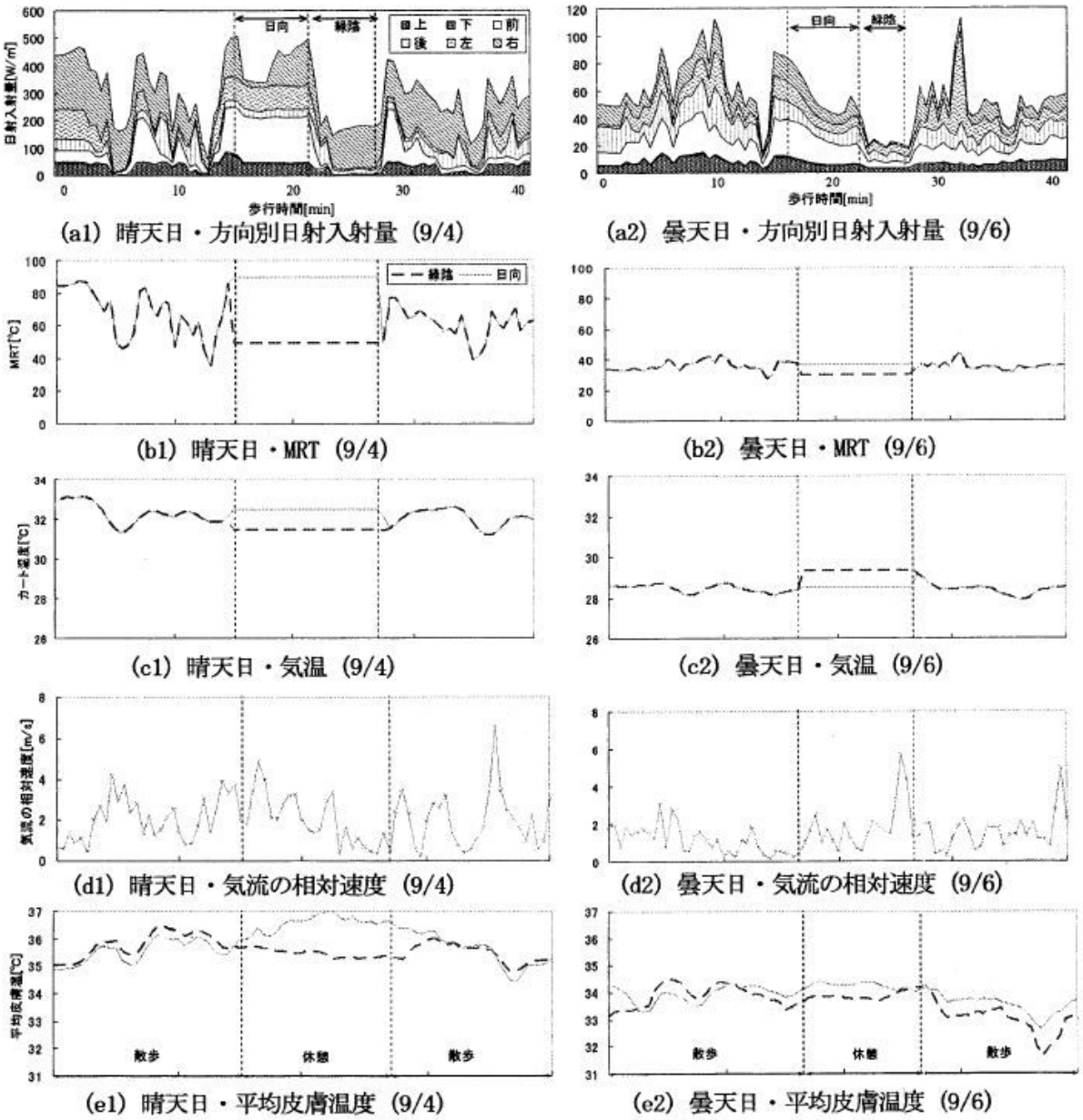

図 1-5　晴天日・曇天時の周辺熱環境と皮膚温の時間変化（文献 24）

樹木の近傍での温冷感評価について、平均風速のみで評価する既存の CFD に対し、植栽による気流の乱れの影響を平均対流熱伝達率の評価に反映できる新たなモデルを開発し、樹木位置での温熱快適性の改善効果を評価できるようになった。（文献 26）

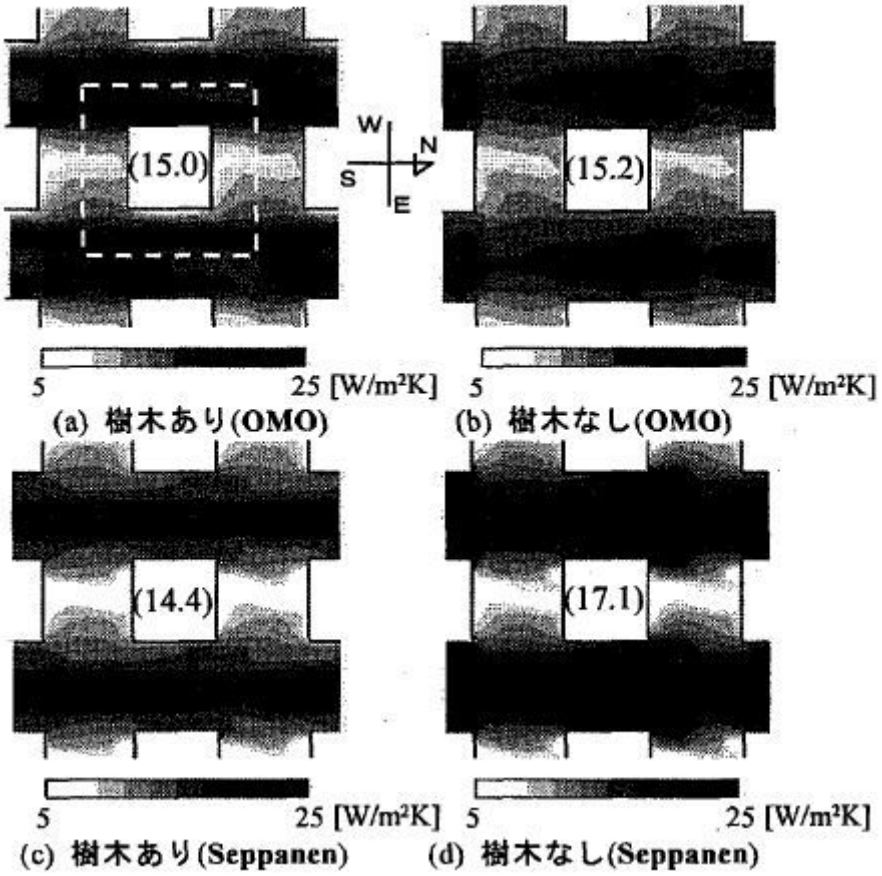

図 1-6　平均対流熱伝達率$\overline{\alpha}_c$の水平分布（高さ 1.5m）（文献 26）

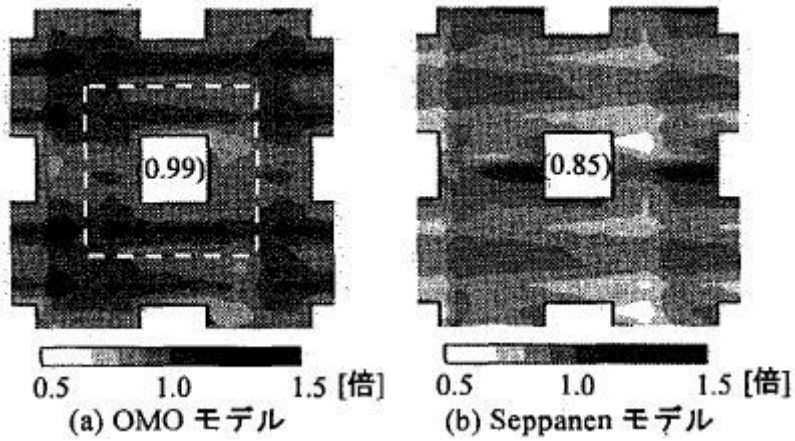

図 1-7　$\overline{\alpha}_c$の変化率の水平分布（樹木あり／樹木なし）（文献 26）

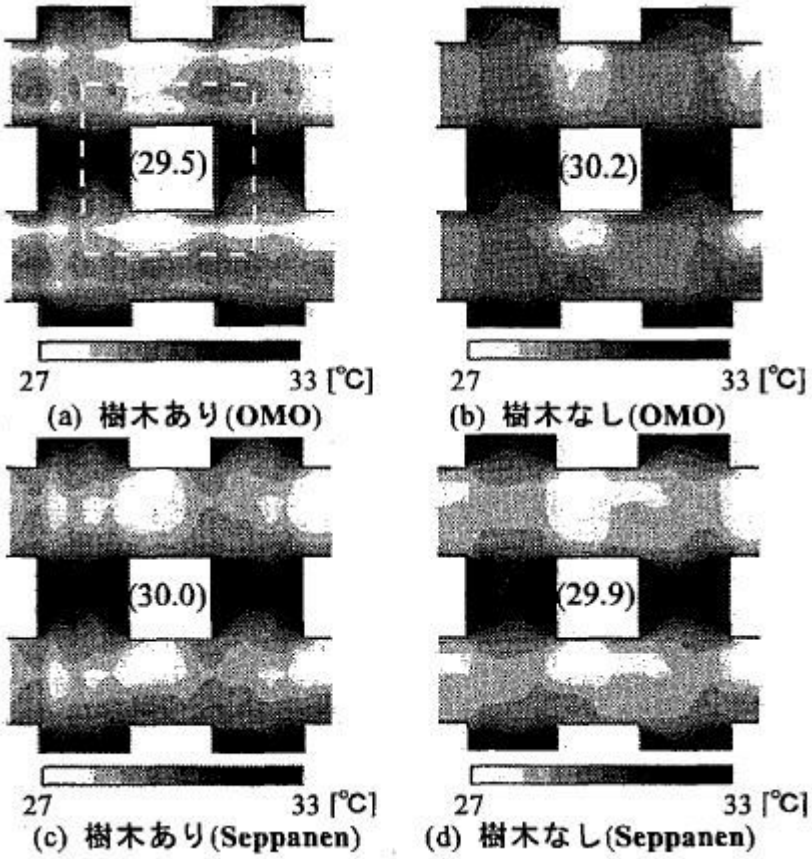

図 1-8　SET*の水平分布（高さ 1.5m）（文献 26）

ただし、過度の植栽が風速を弱め、夏季の熱環境悪化につながる可能性があるとの指摘がある（巻末資料（１章）「ヒアリングシート②」参照）。

２）睡眠阻害

これまでの睡眠と温熱環境に関する調査は、室内における詳細な実験が主要なものであったが、近年、屋外暑熱環境と睡眠との関係を把握し、ヒートアイランド現象による外気温の上昇による睡眠阻害等への影響を研究する事例が見られる。

【既存研究で明らかになっている点】
夏季の夜間最高気温の上昇により、夜間の覚醒や疲労の蓄積等によって、睡眠時間、質ともに阻害され、ヒトの健康に影響を与えている。

東京と大阪で各都市 500 人を対象に睡眠障害の発生状況についてアンケート調査を実施した研究では、0 時の屋外気温が 24.7～30.0℃の間で１℃上昇するごとに睡眠障害者が 7.3%増加していた。また、冷房の使用率は睡眠時外気温が 1℃上昇するごとに東京では 4.5%、大阪では 3.5%増加していた。（文献 28）

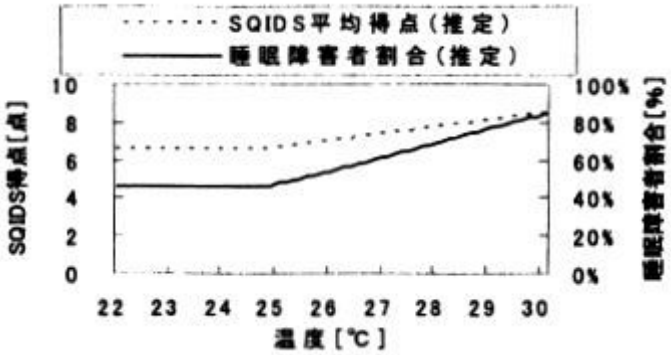

図 1-9　0 時外気温と平均得点（推定）および睡眠障害者率の関係（文献 28）

東京 23 区を対象にした研究では、LIME（日本版被害算定型影響評価手法）を用いた影響評価の結果、深夜 0 時の気温が 1℃上昇した場合、1 日あたり 2 億 5,900 万円の被害となっていた。（文献 30）

環境省が夏に東京、大阪、福岡で各 80 人を対象に調査したところ、屋外最低気温 1℃の上昇につき暑さで目が覚めてしまう人の割合がおおよそ 5%増加することがわかった。また、冷房の使用方法によっては、就寝途中で冷房が停止するなどにより室温変化が激しくなり、結果として冷房を使用した場合の方が同じ屋外気温でも覚醒割合が高くなってしまう状況が見られた。（文献 29）

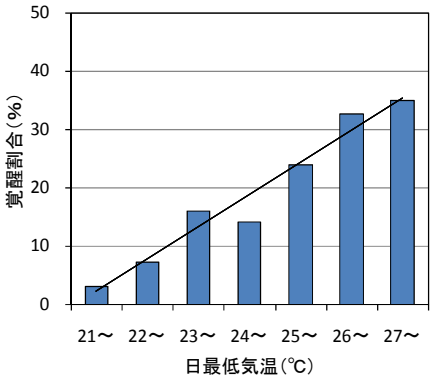

図 1-10　日最低気温と覚醒割合（文献 29）

夜間就寝時の温熱環境が睡眠に及ぼす影響については、暑熱環境は体温の低下を妨げ、睡眠効率[6]を低下させることが明らかになった。冷房時刻の影響について実測した結果については、就寝時の後半に冷房した場合は、前半の暑熱で徐波睡眠が減少し、覚醒が増加した上、後半の冷房においてリバウンド現象が確認され、徐波睡眠がやや増えるなど、睡眠・覚醒リズムへの影響が懸念されることが明らかになった。一方、前半に冷房した場合は、暑熱による徐波睡眠[7]の減少を抑制し、かつ覚醒を抑制した。また、睡眠効率が 90%以上となる睡眠環境を SET*で表すと 23~29℃

[6] 睡眠効率とは、睡眠時間を就寝～起床時刻で除したもの[白川修一郎『睡眠改善学』第 8 章「睡眠の評価法」（ゆまに書房、2008 年 2 月）]。

[7] 徐波睡眠とは、睡眠時の脳波で周波数が 0.5～2Hz、振幅が 75μV 以上のδ波（徐波）が 20%以上を占める睡眠段階 3 と 50%以上を占める睡眠段階 4.を合わせた睡眠で、深睡眠と考えることができる[白川修一郎編『睡眠とメンタルヘルス』（ゆまに書房、2006 年 6 月）]。

となることがわかった。（文献 31）

３）感染症

感染症については、ヒートアイランド現象による影響としてではなく、地球温暖化による気温上昇によって拡大する感染症への影響について研究する事例が見られる。ここでは、日本における気温上昇と感染症に関する最新の文献をとりまとめる。

地球温暖化によるヒト健康に及ぼす感染症の概要を述べた事例では、日本脳炎ウィルスの活発化や日本脳炎媒介蚊（コガタアカイエカ）の生息域拡大及び活動の活発化が進行している（東北地方でも夏季の気温が高い都市には活発化が観察されている）。（文献 34）

また、ヒトスジシマカ（デング熱やチクングニア熱の媒介蚊）の現在の北限が東北地方であり、この北限が年々北上している。ヒトスジシマカの分布域の北限は年平均気温 11℃線とよく一致している。（文献 35）

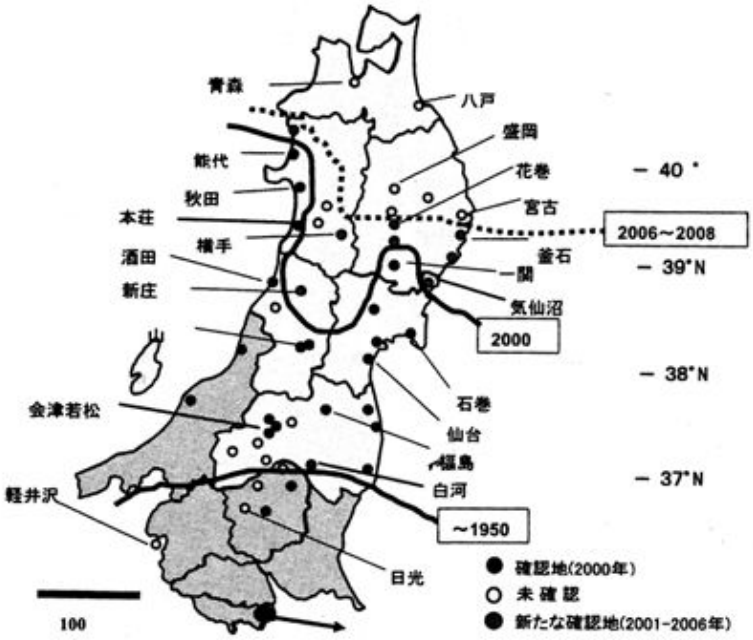

図 1-11　東北地方におけるヒトスジシマカの分布域の拡大（文献 35）

地球温暖化による社会影響をまとめた文献では、デング熱や日本脳炎の場合、高温条件下では蚊体内でのウィルスの増殖率が高まるため、温暖化傾向は、ウィルスの増殖にも影響を及ぼすと指摘している。気温が上昇することで蚊の幼虫の発育速度が速まり、その地域の個体群密度が高まった環境に、病原体を持った動物や患者が侵入すると急激に感染症が流行する可能性があると指摘している。（文献 35）

１．２　エネルギー消費への影響

ヒートアイランド現象が都市のエネルギー消費に及ぼす影響については、これまでも環境省で実施した調査も含め、数多くの研究事例がある。夏季には気温の上昇に伴い、冷房使用が増えてエネルギー消費が増大する。また冬季には、気温の上昇に伴い、特に住宅の暖房や給湯で消費されるエネルギーが減少する。そのため、評価する地域の緯度や建物用途等によって、また季節ごとの気温上昇の程度の違い（例えば、東京の 100 年あたりの気温上昇は、1 月には+3.8℃であるのに対し、8 月には＋2.4℃である。）によって影響評価の結果が異なる。ただし、ヒートアイランド現象が顕著な都心部では、気温上昇によるエネルギー消費増大傾向の強い商業・業務建物が多くなるため、ヒートアイランド現象によるエネルギー消費は増大する傾向にあると考えられている。

最近の研究では、日本の北から南に位置する複数の都市を横並びで評価する事例（文献 2）や、住宅の中でも都心部と郊外での違いを評価する事例（文献 3）も見られる。また、最近の傾向としてヒートアイランド現象によるエネルギー消費への影響を研究するものは少なく（巻末資料（1章）「ヒアリングシート④」参照）、地球温暖化対策を中心とした技術が CO2 削減とヒートアイランド現象緩和の両面に及ぼす効果を研究するものが見られる。

以下にそれぞれの分野における主要な研究成果の概要を整理した。

１）昇温とエネルギー消費

ここでは、気温変化がエネルギー消費に及ぼす影響の地域性（各都市、都心部と郊外、住宅地と商業・業務地区）についてや、ヒートアイランド現象によるエネルギー消費の LCA 評価についての文献をとりまとめる。

札幌、仙台、東京、横浜、大阪、福岡の各都市における、通年で 1℃気温が上昇した場合のエネルギー消費に及ぼす影響を調べたところ（住宅と業務建物を対象）、大阪や福岡ではエネルギー消費が増大するが、その他の地域では住宅の暖房や給湯エネルギー削減の影響が優勢となり、総合的には気温上昇に伴いエネルギー消費が減少すると報告している。（文献２）

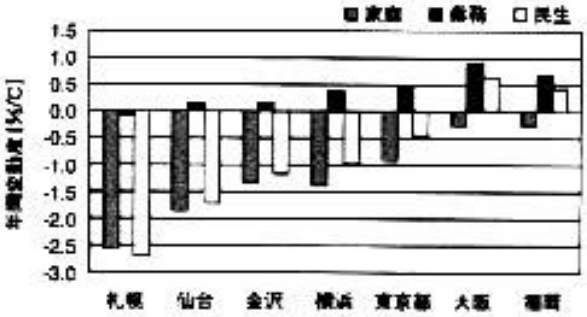

図 1-12　エネルギー消費の気温影響に関する地域特性（文献 2）

大阪府を対象に詳細な影響評価を実施したところ、同じ住宅でも郊外と都心にある場合で結果が異なり、都心部である大阪市を除くと、気温の上昇により、電力（夏季の冷房エネルギー）の増加よりも、ガスや灯油（冬季の暖房エネルギー）の削減が大きくなる。一方で、都心の大阪市では、電力の増加が大きく、年間合計で、気温の上昇によりエネルギー消費量が増加してしまう。（文献３）

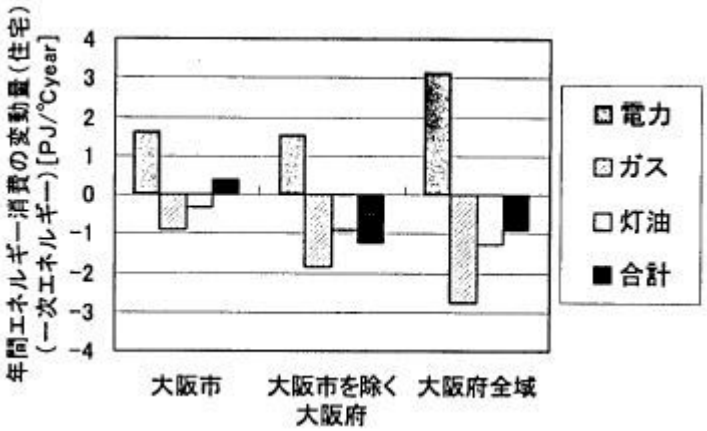

図 1-13　気温 1℃上昇による年間エネルギー消費変動量（住宅）（文献 3）

アテネにおけるヒートアイランド現象がエネルギー消費に及ぼす影響をエコロジカルフットプリント[8]で評価した事例では、ヒートアイランド現象によってアテネ市面積（約 4 万 ha）の 1.5～2 倍の面積のフットプリント増加に相当すると指摘している。（文献４）

また、湿度の変化がエネルギー消費に及ぼす影響を検討した事例では、東京の事務所街区では外気湿度 1g／kg の上昇に対し、建物床面積あたり 1 ～3W／㎡増加することがわかった。（文献 6）

8 エコロジカルフットプリントとは、カナダのブリティッシュ・コロンビア大学で開発された指標であり、WWF（World Wide Fund for Nature 世界自然保護基金）では、この指標を用いて地球の環境容量を計算している。エコロジカルフットプリントは、人々の資源消費量と自然の生産能力とを比較したもの。（平成 14 年版環境白書）

２）ヒートアイランド対策のエネルギー消費削減効果

エネルギー消費への影響に関する研究の最新動向として、様々なヒートアイランド現象緩和対策技術の効果としてのエネルギー消費への影響に関する調査・研究が行われている。

大阪市を対象とした研究事例では、熱帯夜の削減を目標とした場合の、地表面被覆対策や屋根散水、空冷ヒートポンプ型給湯器の導入等の効果を評価したところ、省エネ効果の高い空冷ヒートポンプ式給湯器の導入は夜間に外気を冷やすため、目標達成に大きく寄与することがわかった。（文献 10）

東京 23 区の事務所街区を対象に、各種ヒートアイランド対策の効果をエネルギー消費削減と気温低下で評価したところ、高アルベド化は冷房需要減と暖房需要増でほぼ相殺、地中熱ヒートポンプは 1%削減となった。各種の省エネルギー対策は、現状のトップランナーの 2 倍程度の省エネルギーを図っても気温に影響するまでには至らないとしている。（文献 12）

省エネルギー対策技術とヒートアイランド対策技術に関しては、元来、その効果が異なるため、目的に応じて使い分けるのが良いとの指摘が聞かれた。例えば、顕熱フラックスを抑制するのに有効な屋根散水や屋上緑化、高反射率塗装等について、対策実施地域によっては、エネルギー消費が増加するため有効でないという意見もあるが、エネルギー消費増加に対する大きな影響はなく、省エネルギー対策技術を導入することで問題とはならないと述べている。（巻末資料（1 章）「ヒアリングシート⑤」参照）

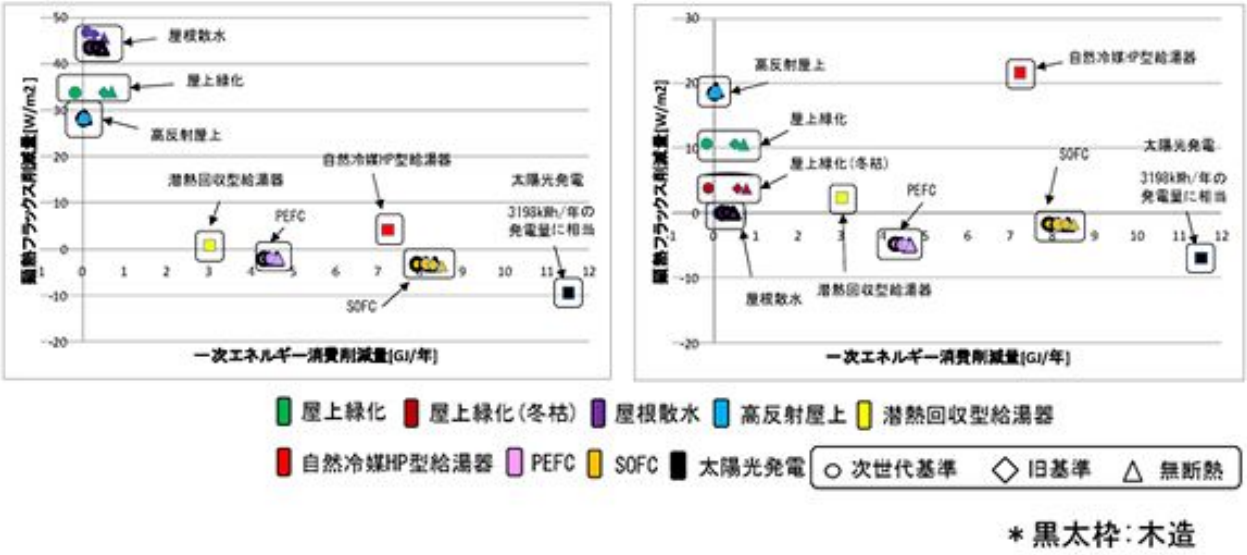

図 1-14　各種対策技術の評価図（文献 9）

（顕熱フラックス：晴天日時間平均値（左：夏、右：冬）、エネルギー消費：年間積算値）

１．３　気象への影響

１）集中豪雨

夏季の夕方等に都市内で多発している集中豪雨に関して、ヒートアイランド現象の影響が指摘されているが、明確な因果関係は明らかにされていない。今回の文献調査では、都市気象のモデリングに関する最新研究、都市集中豪雨の発生メカニズムの解析、気象データ解析に関する文献の収集を行い、ヒートアイランド現象の集中豪雨への影響の知見の充実を図る。発生メカニズムについては、2004 年 8 月 10 日に都心で発生した積乱雲についての解析において、都心の積乱雲は、地上の局地的な低圧部に伴う風のシアーライン（収束ライン）が引き金となって発生したことがわかった（文献６）。ここでは、数値計算、気象データ解析について、最新の研究動向を整理する（発生メカニズムについての文献は巻末資料（1 章）「文献概要」を参照）。

表 1-4　集中豪雨に関する対象文献の研究手法

影響項目	研究手法
集中豪雨	数値計算
	発生メカニズム解析
	気象データ解析

（１）数値計算

WRF[9]を用いて、平成 16 年の新潟・福島豪雨のシミュレーションを行った結果、気象庁が用いている東アジア解析データを初期値に用いた場合では豪雨の発生を再現出来なかったが、米国気象庁の全球解析データを初期値に用いた場合、豪雨の発生が再現され、かつその位置と降水分布も良好に再現できた。（文献 5）

[9] WRF（Weather Research and Forecasting model）とは、米国の天気予報に使われている静力モデル Eta、研究用の非静力モデル MM5 の後継モデルに位置づけられている新しい非静力モデルであり、基礎方程式系は、運動方程式・連続の式・熱力学の式・混合比の保存式からなる（文献４）。WRF の特徴は、水蒸気、雲水、雨水、雪、氷、雹などの予報方程式からなる雲物理モデル、日射量や大気放射量を計算する放射モデル、地表面温度、土壌水分量、積雪量、地表面フラックスを計算する地表面モデルなど、気象にかかわる様々な物理モデルが導入されている点、地球の曲率などを考慮している点、ネスティング機能を有している点、マイクロスケールシミュレーション用としてスマゴリンスキーモデルも利用できる点、変分原理を用いたデータ同化システムを保有している点などである（文献３）。

表 1-5　WRF および国内で用いられているメソスケールモデルと現業モデルの概要（文献 5）

	WRF	ANEMOS	MSM*（現業版）	RSM（現業版）	MM5
基礎方程式	非静力・圧縮	静力・非圧縮	非静力・圧縮	静力・圧縮	非静力・圧縮
座標系	ランベルトもしくはポーラーステレオ座標	マップスケールファクターなし	ランベルト座標	ポーラーステレオ座標	ランベルトもしくはポーラーステレオ座標
計算領域	任意	数 100km 以下で任意	日本とその周辺 (3600*2880km)	東アジア領域 (6500*5140km)	任意
水平分解能	任意	約 5-10km 以上で任意	約 10km	約 20km	任意
鉛直層数	任意	任意	40 層(地上から約 40hPa 高度まで)	40 層(地上から 10hPa 高度まで)	任意
予報時間	任意	任意	18 時間	51 時間	任意
雲物理モデル	冷たい雨モデル（雲水・雨水・雪・氷・霰を予報）	暖かい雨モデル（雲水・雨水を予報）	冷たい雨モデルと積雲対流のパラメタリゼーションの併用	冷たい雨モデルと積雲対流のパラメタリゼーションの併用	冷たい雨モデル（雲水・雨水・雪・氷・霰を予報）
乱流モデル	乱流エネルギーと混合長を予報	乱流エネルギーと混合長を予報	乱流エネルギーと混合長を診断	乱流エネルギーと混合長を診断	乱流エネルギーと混合長を予報
地表面モデル	陸面モデル（表面温度・土壌温度・土壌水分量・流出量・雪氷を予報）	強制復元法（表面温度を予報）	平板熱伝導モデル（表面温度・土壌温度を予報）	平板熱伝導モデル（表面温度・土壌温度を予報）	陸面モデル(表面温度・土壌温度・土壌水分量・流出量・雪氷を予報)

MSM は気象庁の非静力モデル NHM の現業用の名前である

しかし、数値計算には課題が残っており、その１つに、降雨の数値シミュレーションには、カオス的な性質が結果に顕著に現れることがある。カオス性とは、降水のような非線形の強い現象を扱う場合に同条件で計算しても、微細な初期値の差によって大きく結果が異なってしまう性質をいう。このため、降雨が都市の影響かどうかを見極めるためには、初期値や境界条件等、様々なパターンでシミュレーションを行う必要があるとの指摘が聞かれた。（巻末資料（１章）「ヒアリングシート⑥」参照）

（２）気象データ解析

東京都と埼玉県南部を対象に、30mm/h 以上の降雨回数と建物高さ、人工排熱、緑被率等のパラメータとの関係を調べたところ、昼間、郊外と比べて都市域（海側）では降雨回数が増加することがわかった。夜間では明確な関係は見られない。（文献 10）

気象庁がとりまとめた、東京における過去 118 年間の降水データを解析した事例では、夏季の夕方（17～23 時）の短時間降水量は、期間全体として 100 年当たり約 50%の割合で増加してい

ることがわかった。また、最近 30 年間の短時間降水量について東京都心とその周辺地域とで比較したところ、東京都心の降水量は、夏季の夕方において周辺地域より 30%以上多いことがわかった。（文献 11）

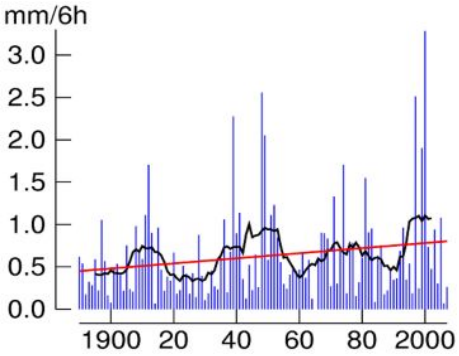

図 1-15　東京の非継続的降水の経年変化
（６～８月の17～23時における平均降水量）
青線：年々の値、黒線：11 年移動平均、
赤線：１次トレンド（文献 11）

神田川流域で浸水被害をもたらした降雨の特徴を解析したところ、夏季高温日午後に生起する例が多いことや、風の収束条件や上空で流れ込む湿度が降水の有無を左右する因子となっていることが指摘されている。（文献 12）

２）大気汚染（光化学オキシダント）

これまでのヒートアイランド現象が大気汚染に及ぼす影響の研究事例では、夏季の光化学オキシダントやその他の大気汚染との関係について、実測結果等による定性的な解析結果が報告されている。最近の研究事例では、より定量的に地形や気象の影響も含めた詳細な解析が見られる。また、特徴として台湾等の海外の文献も数多く見られる。

【既存研究で明らかになっている点】

東京都をはじめとする首都圏では、光化学オキシダント濃度が上昇し、高濃度のオキシダントが出現する頻度が増加する傾向にある。光化学オキシダント濃度上昇の要因としては、日射量等の気象要素の変動、原因物質の NOx、NMHC の濃度変化との関係、東アジア等からの広域移流等が考えられている。

ここでは、主に光化学オキシダントを中心に、ヒートアイランド現象が大気汚染に及ぼす影響について、実測・数値モデルの両面から知見を収集する。

台湾における研究事例では、ヒートアイランド現象が発生する気圧配置（北西からの微風）では、ヒートアイランド現象の強さとともに大気汚染（NO2、CO2、CO）が増加する。また、夜間のヒートアイランド現象による風の収束がオキシダントの前駆体を蓄積させ、翌日の大気汚染を助長することが指摘されている。（文献 15）

同じく台湾の研究事例では、ヒートアイランド現象が海陸風循環に大きく影響し、日中の海風を強化するとともに夜間の陸風を弱め、台北の大気汚染の拡散に影響を及ぼしている。(文献 16)

関東地方の地域気象と大気汚染の関係を観測データから解析した既存研究を整理した事例からヒートアイランド現象との関連について抜き出すと、東京の海風前線は東京区部の内陸側まで進入して数時間停滞し、内陸側郊外によどみ域が形成され、大規模局地風の発達とともに内陸側に急速に進行して大気汚染を内陸に輸送するとされている。また、光化学オキシダント高濃度日数が増加しているが、この原因の一つは夏季晴天日や海風発達日の増加で 40%近くを説明できるとされる。(文献 18)

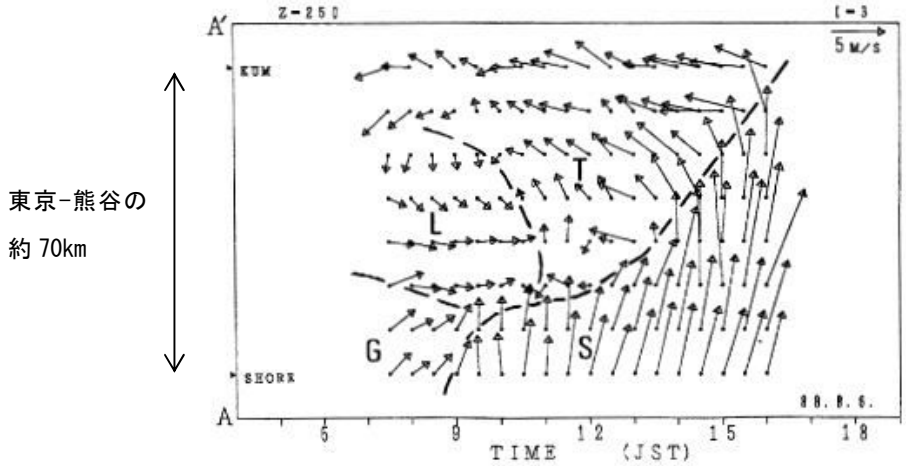

図 1-16　海風前線の東京区部内陸側境界付近での停滞（文献 18）

（縦軸は東京から熊谷[70km]までの北西方向の距離を表している。9:00 くらいから東京湾からの海風が吹き始めるが、約 10～20km の地点（区部内陸側）で 12:00 過ぎまで停滞し、午後になると海風がより内陸部まで入り込み、16:00 には熊谷まで到達している。）

光化学オキシダント濃度の上昇について、大阪府を対象に解析した事例では、1℃の気温上昇により 5.3ppb、率にして 11%の増加となった。また、植生起源 VOCs の増大が光化学反応の促進にくらべて 2 倍強のインパクトが有ると指摘している。(文献 19)

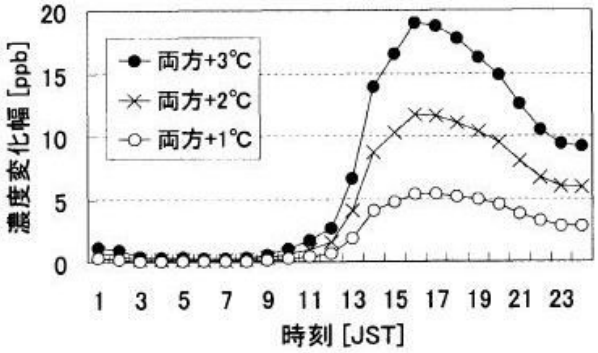

図 1-17　昇温に伴う光化学オキシダント濃度の現況に対する変化量（文献 19）

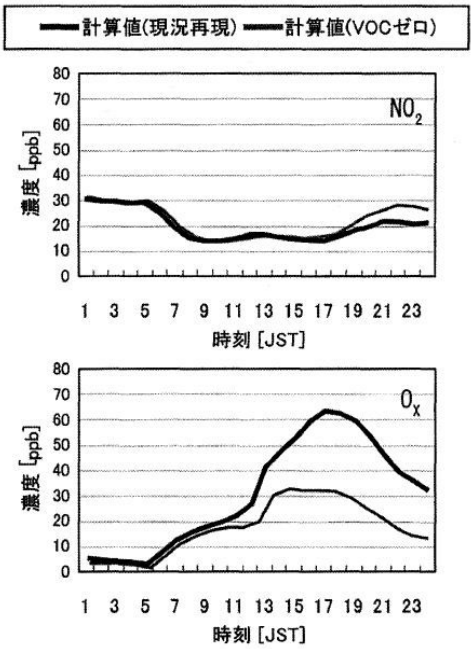

図 1-18　植生起源 VOCs が各物質の濃度に与える影響（上：NOx、下：オキシダント）（文献 19）

90 年代の光化学オキシダントの濃度変化をとりまとめた結果、10 年間に、昼間（5～20 時）平均で若干の例外を除き 4～14ppb（体積混合比）、夜間平均でも 2～8ppb 上昇し、1 日最高濃度が 60ppb 未満の日の比率は全域平均で 66%から 50%へ減少する一方で、東京都、埼玉県には 120ppb 以上の高濃度の出現頻度が 23 日から 50 日というように倍加した地区が多いことがわかった。（文献 23）

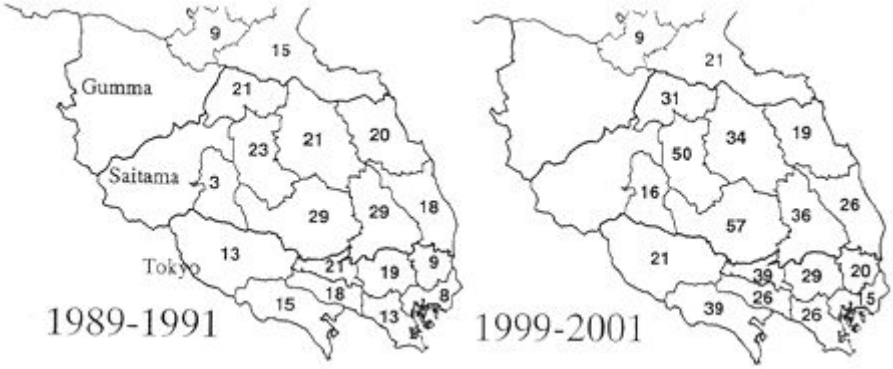

図 1-19　東京都、埼玉県、群馬県における 6～8 月の
高濃度光化学オキシダント発生日数（文献 23）
（高濃度日の定義は、領域内の 1 地点でも昼間に 120ppb 以上が 2 時間以上続いた日）

また、10 年間で、東京湾から埼玉南部への海風の内陸進入の速度の早い日の頻度が増加しており、その結果、速い日は東京や埼玉南部の光化学オキシダント濃度レベルにはあまり変化がなく、より内陸部で 90 年頃よりも高濃度になっており、遅い日のグループでは全域的に午後の光化学オキシダント濃度が大幅に増加したことがわかった。（文献 23）

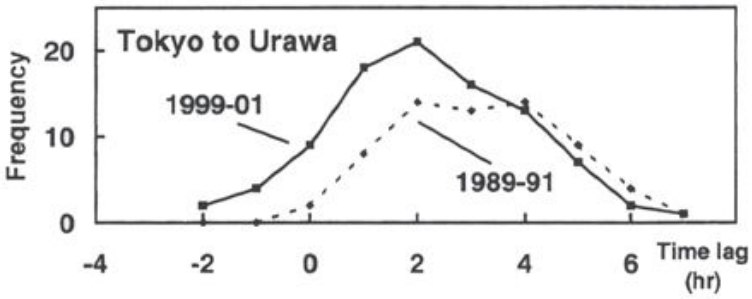

図 1-20　東京・浦和における海風開始時刻の時間差別の頻度（文献 23）

このような関東地方における光化学オキシダント濃度の上昇要因として、1976 年～2002 年の 27 年間を対象に統計解析を行った結果、気象要素以外の上昇要因の一因として、東アジアからのオゾンの広域的な移流、また、1996 年以降、NMHC／NOx 濃度比がやや上昇傾向にあることが、急激な高濃度オキシダント出現頻度の増加をもたらしている可能性が大きいことが示唆された。（文献 22）

その他の要因として、90 年代の 10 年間スケールで、夏季の好天日が増加していることが挙げられている。また、高濃度出現率も特に東寄り地衡風の場合に増加していることがわかった。この気候変化のみで高濃度日増加のかなりの部分が説明できるとされる。（文献 24）

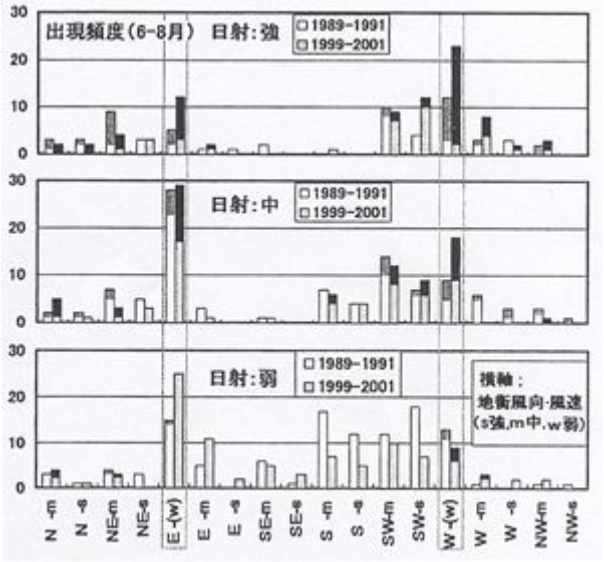

図 1-21　気象パターン別の出現頻度と光化学オキシダント高濃度日数
（各カラム上部の網かけ部分）（文献 24）
（横軸に示す地衡風型のうち、弱[w]は 5m/s 未満で東寄り[E]と西寄り[W]の 2 分類）

また、ヒートアイランド現象は、地表面の加熱による上下対流の活発化により、海風を食い止めるため、それにより郊外に出来たよどみ域が、原因物質である NOx や NMHC を集積させる。また、午後の海風前線の内陸側への進入により、よどみ域にできた汚染気塊を関東北部に輸送す

るため、高濃度オキシダントの濃度分布に影響を及ぼしているとの指摘が聞かれた（巻末資料（1章）「ヒアリングシート⑦」参照）。

1990～2002 年の濃度上昇要因について解析した研究では、観測値の上昇率 0.65ppb／年のうち、0.50~0.53ppb／年（約 79%）は、日射量、風速の変動以外の要因であることがわかった。気象要素以外の要因として、原因物質である NMHC と NOx の比が挙げられている。比が 6 以上の範囲で高濃度オキシダントが出現する頻度が高く、8 以上では 0.16ppm 以上の割合がさらに高まることが明らかになった。（文献 26）

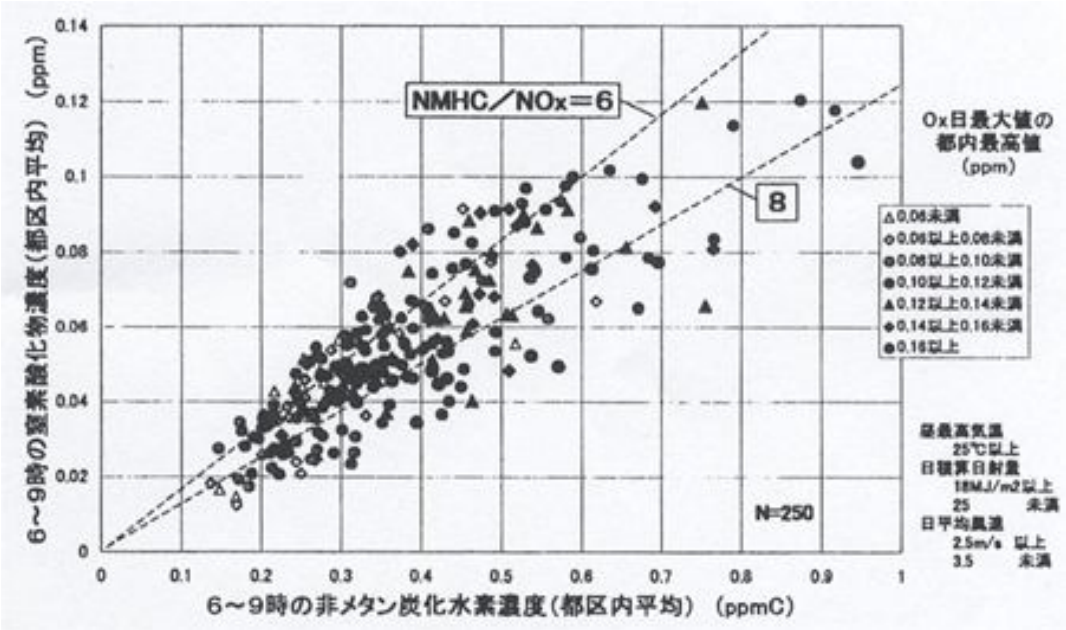

図 1-22　NMHC、NOx と Ox との関係（文献 26）

NMHC／NOx の濃度比に関連して、光化学オキシダント濃度について、原因物質である NOx の排出が少なくなる週末に、NMHC／NOx 比が上昇し、逆に光化学オキシダント濃度が高くなってしまう「ウィークエンド効果」があり、これは、NOx の減少に比して、NMHC の減少率が低い場合、NOx の O_3 分解作用が減るためであるとの指摘が聞かれた。（巻末資料（1 章）「ヒアリングシート⑦」参照）