

平成 17 年 9 月修了
博士（学術）学位論文

都市緑地の熱環境のモデル化による
地域環境管理・経営に関する研究

Study on the Regional Environmental Management and Administration
on the basis of Modeling Heat Environment in the Urban Green Spaces

平成 17 年 6 月 17 日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻

学籍番号 : 1066012

馬渕 泰

Yasushi MABUCHI

都市緑地の熱環境のモデル化による地域環境管理・経営に関する研究 目 次

論文要旨

第1章 はじめに	1
1.1 本研究の目的	1
1.2 研究背景	2
1.2.1 地球温暖化の実態	2
1.2.2 都市温暖化（ヒートアイランド）の実態	3
1.2.3 地球温暖化問題とヒートアイランド問題の視点	5
1.2.4 ヒートアイランド対策の着目点	6
1.2.5 ヒートアイランド対策としての都市緑地の重要性	8
1.2.6 都市緑地の整備と管理・運営における現状の問題点と課題	9
1.3 研究手順と論文の構成	10
第2章 既往研究のレビューと温暖化対策の現状の整理	12
2.1 ヒートアイランドとクールアイランドの定量化に関する関連研究の展開	12
2.1.1 ヒートアイランド現象のメカニズムの整理	12
2.1.1.1 ヒートアイランド現象のメカニズム	12
2.1.1.2 熱環境（潜熱・顕熱）定量化手法	13
2.1.1.3 都市の人工排熱の定量化手法	15
2.1.2 ヒートアイランド現象に関わる既往研究のレビュー	16
2.1.2.1 ヒートアイランドの実態に関する研究事例	16
2.1.2.2 ヒートアイランド現象の定量化手法に関する研究事例	16
2.1.2.3 都市の人工排熱とヒートアイランド現象との関係に関する研究事例	18
2.1.2.4 都市緑地とヒートアイランド現象との関係に関する研究事例	18
2.2 都市緑地の環境経済評価に関する関連研究の展開	22
2.2.1 環境経済評価の一般論	22
2.2.1.1 環境経済評価の概要	22
2.2.1.2 事業評価における環境経済評価の位置づけ	22
2.2.1.3 環境の価値の種類	23
2.2.1.4 環境経済の評価手法	24
2.2.2 都市緑地の公益的機能の整理	27
2.2.3 都市緑地の環境経済評価における関連研究のレビュー	29
2.2.3.1 緑地を構成しているパーツ（水辺空間、緑地）の環境経済評価事例	29
2.2.3.2 都市緑地の持つ機能に着目した環境経済評価事例	31
2.2.4 環境評価の政策利用の現状	32

2.2.4.1	米国における環境手法の政策利用	32
2.2.4.2	環境税（炭素税）の導入	32
2.2.4.3	環境取引（京都メカニズム）	33
2.2.4.4	環境政策の効果的実施方法	34
2.3	ヒートアイランドおよび地球温暖化対策の現状	35
2.3.1	ヒートアイランド対策の現状	35
2.3.1.1	人工排熱量削減対策	35
2.3.1.2	地表面被覆の改善（緑被の減少）施策	35
2.3.2	世界各国における地球温暖化対策の現状	37
2.3.2.1	国際的な地球環境問題への取り組みと国際条約	37
2.3.2.2	「気候変動に関する政府間パネル」（IPCC）による評価報告	39
2.3.2.3	京都議定書（COP3）	40
2.3.3	日本における地球温暖化対策とヒートアイランド対策	41
2.4	本論文の位置づけ	43
第3章	都市熱環境問題における都市緑地の重要性の検証	45
3.1	都市人工排熱解析	45
3.1.1	解析の考え方	45
3.1.2	横浜市都市計画局（土地利用）地理情報システム（GIS）	46
3.1.3	大都市における人工排熱特性	47
3.1.3.1	横浜市のエネルギーフロー	47
3.1.3.2	横浜市におけるエネルギー消費の特徴	48
3.1.4	都市計画 GIS データによる都市人工排熱量の評価	49
3.1.4.1	人工排熱原単位の設定	50
3.1.4.2	人工排熱算定結果	50
3.1.4.3	人工排熱量の時間変動	52
3.2	都市全体から見た緑化の熱環境緩和効果の検証	54
3.2.1	解析手順	54
3.2.2	解析使用データ	54
3.2.3	LandsatTM を用いた赤外放射輝度の推定	55
3.2.4	植物活力度（NDVI）と Band6 の関係調査	57
3.2.5	植物活力度の増減による温度予測シミュレーション	58
3.3	風の影響を考慮した都市緑地のクールアイランド効果	60
3.4	本章のまとめ	62
第4章	都市緑地のクールアイランド効果の評価モデル	64
4.1	都市緑地のクールアイランド評価の着目点	64
4.2	都市緑地のクールアイランド効果の評価モデルの概要	65

第5章 都市緑地のクールアイランド効果の定量化	66
5.1 樹木と浅い水面を含む都市公園の熱環境特性の定量化	66
5.1.1 解析方法	66
5.1.1.1 解析の考え方	66
5.1.1.2 解析対象地の概要	67
5.1.2 都市公園を対象とした熱環境調査	68
5.1.3 都市緑地の地表面温度特性	69
5.1.4 樹木と浅い水面を含む都市緑地の熱環境特性	70
5.1.4.1 土地被覆別の熱収支の推定手法	70
5.1.4.2 都市緑地の顕熱・潜熱の評価	73
5.2 多様な植生で覆われた雨水調整池での熱環境特性の定量化	75
5.2.1 解析方法	75
5.2.1.1 解析の考え方	75
5.2.1.2 解析対象地の概要	75
5.2.2 熱環境調査	76
5.2.3 都市内水域の熱環境の現状	78
5.2.3.1 地表面温度計測結果	78
5.2.3.2 植生の有無による水温の変化	78
5.2.3.3 現地気象観測当日の各種気象状況	79
5.2.4 多様な植生を有する水面の熱環境特性	79
5.3 観測結果と既往観測結果との比較	82
5.4 都市緑地のクールアイランド効果	84
第6章 都市緑地のクールアイランド効果の予測	85
6.1 都市緑地のクールアイランド効果の将来予測手順	85
6.2 樹木の生長を考慮したクールアイランド効果予測モデルの検討	86
6.2.1 既往調査からの樹木（クスノキ）の樹齢と胸高直径との関連調査	86
6.2.2 航空機 MSS データを用いた NDVI をパラメータとした樹木（クスノキ）の生長モデルの構築	87
6.2.2.1 航空機 MSS 観測概要	87
6.2.2.2 NDVI をパラメータとしたクスノキの生長モデルの構築	88
6.2.3 樹木（クスノキ）の NDVI と潜熱フラックスとの相関性検討	90
6.3 土地被覆の違いによるクールアイランド効果の特徴	91
第7章 クールアイランド効果の環境経済性	93
7.1 クールアイランド効果による環境経済性の推定手順	93
7.2 クールアイランド効果による CO ₂ 排出削減量の推定	95

7.3	石土池のクールアイランド効果の環境経済性の評価	97
第8章 クールアイランド効果に配慮した都市緑地の整備計画立案支援モデルの検討		
		98
8.1	クールアイランドに配慮した都市緑地の整備計画の立案支援モデル	98
8.1.1	クールアイランドに配慮した都市緑地整備計画の策定手順	98
8.1.1.1	都市緑地整備計画におけるクールアイランド効果の位置づけ	98
8.1.1.2	クールアイランドに配慮した都市緑地計画の策定手順	98
8.1.2	クールアイランド効果を機能させる都市緑地整備の環境目標の設定	100
8.1.3	クールアイランド効果の視点からの都市緑地の整備計画の評価関数の設定	101
8.1.3.1	都市緑地のクールアイランド効果関数の設定	101
8.1.3.2	コスト関数の設定	105
8.2	都市緑地整備計画におけるクールアイランド効果を発揮させるための 土地被覆の組み合わせ	107
8.3	クールアイランド効果を機能させるための都市緑地の整備方針	110
8.4	総合的な都市緑地の環境経済評価モデルの提案	111
第9章 クールアイランド効果を保全するための持続的・自立的な都市緑地の 環境管理・経営モデルの提案		
		116
9.1	都市緑地の環境維持管理手法の一般論と動向	116
9.1.1	環境維持管理手法	116
9.1.1.1	維持管理の目的	116
9.1.1.2	都市緑地の維持管理の内容	117
9.1.1.3	都市緑地の維持管理計画	117
9.1.2	都市緑地の維持管理体制の動向	118
9.1.2.1	長池公園（東京都多摩市）周辺の地域管理	118
9.1.2.2	米国ヨセミテ国立公園環境管理	119
9.1.2.3	セントラルパーク（米国ニューヨーク）公園管理	121
9.1.2.4	事例研究のまとめ	123
9.1.3	環境教育の動向	125
9.1.3.1	国営木曾三川公園の取り組み	125
9.1.3.2	武蔵丘陵森林公園	126
9.2	クールアイランドを持続させるための都市緑地の環境管理モデルの検討	129
9.2.1	クールアイランドを持続させるための環境管理目標の設定	129
9.2.2	都市緑地の環境維持管理の内容	130
9.2.3	持続的な都市緑地の環境管理運営体制の検討	131
9.2.3.1	環境管理におけるNPO役割分担の検討	131

9.2.3.2	NPO（大学）による都市緑地管理の活動内容	132
9.2.4	都市緑地の持続的な環境管理と環境教育の方向性	133
9.3	クールアイランド効果に配慮した石土池の持続的・自立的な 都市緑地管理モデルの提案	135
9.3.1	PCM手法の概要と実施手順	135
9.3.1.1	PCM手法の概要	135
9.3.1.2	PCM手法を適用した参加型計画手法策定の手順	136
9.3.2	検討対象地の現状分析	137
9.3.2.1	対象地の概要	137
9.3.2.2	石土池の水質特性	138
9.3.2.3	石土池の植生環境	139
9.3.3	クールアイランド保全の視点から見た石土池の水界生態系環境の 問題点分析	140
9.3.4	石土池のクールアイランド効果を復元・保全するための目的分析	142
9.3.5	水辺環境の改善アプローチの抽出及びPDMの作成	146
9.3.6	石土池の水辺環境再生アプローチの審査	149
9.3.7	三位一体（地域住民、行政、NPO(大学)）による石土池管理運営フレームの 予備的検討	151
9.3.7.1	石土池周辺の住民活動の現状	151
9.3.7.2	石土池の調整池管理の現状	151
9.3.7.3	三位一体（地域住民、行政、NPO(大学)）による石土池 管理運営フレーム	151
9.4	都市緑地の環境経営モデルの検討	153
9.4.1	都市緑地の環境経営モデルの検討手順	154
9.4.2	クールアイランド保全の視点からの都市緑地の整備および維持管理に対する住 民の支払い意思額（WTP）の推定	154
9.4.3	クールアイランド効果を機能させるための環境コストの推定	161
9.4.4	都市緑地の環境経営モデルの提案	163
9.4.5	都市緑地の環境経営モデル実現への課題	172
第10章	おわりに	176
10.1	本研究のまとめ	176
10.2	今後の課題	180
	謝辞	182
	参考文献	183

論文要旨

近年、都市のヒートアイランド現象が新たな社会問題となりクローズアップされ始めている。都市及びその周辺の地上気温分布において、等温線が都心部を中心として島状に市街地を取り巻いている状態をヒートアイランド現象と呼んでいる。代表的な都市の年平均気温の上昇速度は、1900年から2000年の100年間に東京都は+3.0°C、ニューヨークでは+1.7°Cであり、地球温暖化の進行速度の約3~5倍に及んでいる。ヒートアイランドが発生することによる社会的な影響としては、夏季では昼間の局地的高温化や熱帯夜による冷房用電力消費の増加や、都市部と郊外部の境界付近における短時間集中豪雨による洪水被害の増加が挙げられ、冬季は暖房などによる電力消費量（人工排熱量）が増加することにより気温のベースラインが上昇し暖冬化を促進する。このことから、冬季における温暖化現象は相対的に実被害を伴うことは少なく、夏季の局地的な高温化による異常な気象変化が都市の社会インフラに被害を及ぼすなど、都市における社会問題として位置づけられ、地球環境時代の新たな環境インフラ整備のあり方や方向性についての議論が始まっている。ヒートアイランド対策は、“人工排熱の削減”と“地表面土地被覆の改善”が二本柱として実施に移されているが、ヒートアイランドを緩和する上で熱環境緩和効果を効率的・効果的に得るための具体的な施策の抽出が不可欠となってきた。都市の温暖化の主要な影響要因である都市顕熱（地表面のコンクリート・アスファルト化）と人工排熱で比較した場合、夏季では1.5倍ほど都市顕熱が多く、夏季の高温化の主要因は人工排熱の増大よりも都市の対流顕熱の増加にあると考えられる。そこで、都市の対流顕熱を減少させるための一手段として都市緑化の効果に注目している。

現在、都市緑化政策は、大別して“建物緑化”、“道路緑化”と“都市緑地設置”が提示されている。その中で都市緑地は、基本的に緑の少ない日本の都市部において市民と生態系が接する貴重なエコ・トープを形成しているだけでなく、都市の熱環境を緩和する環境資源（クールアイランド源）として国および地方自治体が注目し始め、新たな環境施策の要の一つに位置づけられるようになってきている。しかし、近年の逼迫した厳しい財政状況の下、都市緑地整備関連の公共事業には透明性、客観性がより求められ、事業の目標や目的及び有効性・効率性を明らかにした上で、市民の参画を得た合意形成を図るプロセスにも関心が集まっている。我々の身近な緑地が持つ気候緩和効果への期待が高まっており、クールアイランド効果を最大限に発揮する都市緑地整備計画の立案と効果を保全・維持する地域環境管理のモデルを具体的に提案する応用実務的な研究に着目した。この課題を解決するためには、既往研究の成果を踏まえた上で、都市のクールアイランド現象と大気温調整効果のメカニズムを明らかにするとともに、都市熱環境の定量化から予測、環境経済評価そして持続的・自立的な環境管理までの一連の流れをプロジェクトのサイクルに沿って明確にする必要がある。

本研究のコンセプトは、都市環境（クールアイランド）に配慮した持続的な“環境インフラ整備計画”（都市緑地）と“持続的・自立的な環境マネジメント”（維持・管理・運営）を融合させ、政府や地方自治体を中心となって検討している地域レベルの“環境政策”（ヒ

ートアイランド対策)に本研究の成果を反映させる三位一体型のプロジェクト・サイクルに着目している。具体的には、現在都市域で進行しているヒートアイランドを緩和する効果を有する都市緑地のクールアイランドの実態とメカニズムを明らかにし、潜熱フラックスの視点からクールアイランド効果を定量的に評価することから、クールアイランド効果に配慮した都市緑地の整備計画や維持管理運営のモデルを提案することを目的としている。

本論の主要な論点は以下の5点である。

- ① 都市熱環境問題における都市緑地の重要性の検証
- ② 都市緑地のクールアイランド効果の定量化
- ③ クールアイランド効果に配慮した都市緑地の整備計画立案支援モデルの検討
- ④ クールアイランド効果を保全するための持続的・自立的な都市緑地の環境管理モデルの提案
- ⑤ 都市緑地の環境経営モデルの提案

以下に、上記の5つの論点について要約する。

① 都市熱環境問題における都市緑地の重要性の検証

都市の温暖化問題への関心が高まる中で、ヒートアイランドやクールアイランドなどの都市気候に関わる熱環境問題が新しい都市問題へのテーマとして浮上してきている。現在、政府が掲げている「環境と共生した都市づくり」は、1)省エネ・省資源・リサイクル(エネルギー)、2)水循環型(水)、3)都市大気保全・気候緩和・自然共生型(緑)の3本柱の都市づくりの要素からなり、その中で「緑」と「水」は、自然の大気水循環システムを構成する重要な都市計画の環境構成要素でもある。そこで、都市内の緑の増減が都市熱環境に及ぼす影響及び緑地や水面の有する潜熱輸送による気温調整効果が地域レベルの温暖化に影響しているかをGISと衛星リモートセンシング技術、シミュレーション技術を用いて解析した。代表的な一例として、横浜市全域を対象として、夏期(8月)の晴天日の午前10:00(衛星ランドサットが横浜市上空を通過した時間)の気象条件で、市街化地区を10%、20%緑被率を増加させた場合、地表面温度は現状(気温換算:30.22℃)より-0.32℃(気温換算:30.12℃)、-0.89℃(気温換算:29.96℃)低下する。横浜市の平均気温は過去100年間で2.6℃上昇しているが、シミュレーション結果から、市街地を20%緑化することで約10年前の気温に戻すことが可能である。次に、住宅団地と大規模緑地と高層商業ビル群が共存するニュータウンを対象とした都市熱環境の現地気象観測とモデル・シミュレーション結果によれば、都市緑地がクールアイランドとなっており、緑地の冷気が若干ながら風下側へと移動して都市化地域の高温化を緩和している。都市内部のまとまった緑は、周辺地域の冷却源となるだけでなく、熱帯夜を緩和する効果を有する。

都市緑化のうち屋上緑化は、ヒートアイランドを抑制する効果はあるものの、多くの人々の目につかず、多様なエコ・トープを形成するシステムにはなりにくい。ある程度の範囲を持ったエコトープとしての緑が分布する都市緑地は、ヒートアイランド緩和だけでなく、生態系、景観、防災の視点からも都市に必要な環境構成要素の一つである。

② 都市緑地のクールアイランド効果の定量化

本論では、植物や水面が蒸発散する際の気化熱である潜熱フラックスをクールアイランド効果として定量化する。

都市緑地のクールアイランド効果定量化の対象地は、首都圏東京に位置する典型的な都市緑地である東京都多摩ニュータウンの「多摩中央公園」と高知県南国市の十市パークタウンに建設された雨水調整池「石土池」である。多摩中央公園では樹林地と芝地、浅い水面（非対流性の水深 50cm の人工池）を、石土池では水生植生が繁茂した水面（水深 1~3m の半人工池）の熱環境特性をそれぞれ定量化し、都市緑地の「緑と水面」のクールアイランド効果について考察した。多摩中央公園は、多摩ニュータウンの造成に伴い新規に開発された都市緑地であり、①緑地の周囲は商業施設や住宅地で囲まれており都市緑地のクールアイランド効果が明確に把握でき、②広さ 10ha の比較的規模を持ったオープンスペースであり、③公園には樹林地や水面、芝地、公園施設など都市緑地を構成する典型的なパーツがすべて揃っている。石土池は、周辺の十市パークタウンの造成に伴い新規に整備された雨水調整池であり、①当地の夏季の気候特性として日中は南風が卓越し、東西に分布している樹林帯の影響を受けずに池のみのクールアイランド効果の計測が可能であること、②石土池の水面には抽水性水草（ハス）、浮遊性水草（ホテイアオイ）、浮葉性水草（ヒシ、ガガブタ）などがほぼ均等に分布し、水界植生の多様性と豊かさは都市緑地の公共水面設置モデルとしては理想に近い。よって、本論の対象地である「多摩中央公園」と「石土池」は、都市緑地のクールアイランド効果を評価するための代表モデルケースとして位置づけている。

多摩中央公園のケースでは、被覆別のクールアイランド効果をもっとも顕著に出る南中時（12:00）の潜熱フラックスは、樹林地が最も大きく（約 519Wm^{-2} ）、次いで芝地（約 401Wm^{-2} ）、浅い水面（約 230Wm^{-2} ）の順となっており、樹林地のクールアイランド効果の優位性が示された。また、底面と側面をコンクリートで囲まれた水面の表面温度は昼間で 30°C を超え、夜間でも最低 25°C と高い水温状態が明け方まで継続している。これは、池の 3 面がコンクリートで構成されているため、昼間の貯熱量が底面のコンクリートを暖める熱量にも使われ、夜間にコンクリートから水塊へと熱が移動することにより、水温の高い状態が継続し明け方にかけても解消されず蓄熱が累積していくことが原因となっている。次に、石土池のケースにおける南中時の潜熱フラックスは、植生（ハス、ホテイアオイ、ヒシ・ガガブタ）で被覆された水面で $300\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、植生のない水面で $100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ であり、水面に水草が繁茂することによりクールアイランド効果は増加している。現地熱収支観測結果をもとに算出された潜熱フラックスは、既往の類似観測事例から算出された結果の範囲内にあり、少なくとも相対的な差異を議論するプロセスではオーダー的には妥当なレベルにある。

③ クールアイランド効果に配慮した都市緑地の整備計画立案支援モデルの検討

これまで検討してきた都市緑地のクールアイランド効果の評価モデルを応用して、クールアイランド効果を機能させるための都市緑地の整備計画立案の意思決定支援モデルとしての活用を検討した。本モデルは、都市緑地を造成した場合のクールアイランド効果、造成コ

ストを都市緑地の土地被覆を指標として関数化し、実施効果が最大となる土地被覆の組み合わせを求めることができる。さらに、一定の予算配分下、土地被覆の制限条件などに対するクールアイランド効果の予測も可能である。

次に、クールアイランド効果を機能させるための都市緑地整備方針について以下に整理した。

- ・ 樹林地と同じクールアイランド効果を求める場合、樹林地面積の 1.5 倍の芝地面積、2.6 倍の水域面積が必要となる（樹齢 29 年、20 年後を試算）。よって、クールアイランド効果に配慮した公園緑地の土地利用計画は、緑地を多くし水面面積を少なくする方針で整備する。
- ・ コンクリートで覆われたオープンな浅い水深を持つ人工池の設置は避ける必要があり、壁面や底面を泥質又は砂泥質などの天然材料、または、自然の土壌を生かした構造に改善し、池の底面から下層部へ熱の移動を容易にさせる。
- ・ 池を水生植物（ハス、ホテイアオイ、ヒシ・ガガブタなど）で被覆し蒸発潜熱を増加させる。その場合の池に対する植生の被覆率は、植物プランクトンの増殖（富栄養化）を抑えるため、池全体の面積に対して 3 割程度を目標とする。これにより、池の潜熱フラックスは、植生のない場合と比較して 1.2~1.5 倍上昇する。

④ クールアイランド効果を保全するための持続的・自立的な都市緑地の環境管理モデルの提案

都市緑地のクールアイランド効果を地域の次世代を視野に入れて保全するために、「石土池」を例に PCM(Project Cycle Management)手法を組み入れた環境管理モデルを検討した。

石土池は、多様な水生植物が水面の 3 割以上分布しているため、池の水質環境を保全し、かつクールアイランド効果をより高めているが、ホテイアオイが池の持続的な環境管理という視点から大きな問題になろうとしている。ホテイアオイは、冬季に枯死しその腐敗物が池底に沈殿するサイクルを繰り返すことにより池の水深が浅くなり、水質環境が悪化するとともに洪水調整機能が損なわれる要因となっている。そこで、池のクールアイランド効果を保全するために、ホテイアオイをハスなどの抽水性水草に置き換えて、良好な水質環境を保全するモデルを検討した。さらに、クールアイランド効果の保全を含む地域環境管理のモデルとして、三位一体（地域住民、NPO(大学)、行政）のコンセプトに基づいた持続的・自立的な環境管理モデルを提案した。本モデルは、行政や地域住民と NPO 等の多様な主体が都市緑地管理のビジョンを共有しつつ、池の開発・管理にかかわる許認可とプロジェクト予算管理を行政側が、維持管理の具体的な企画・立案及び環境維持管理や利用面に関する各種プログラムの実施を NPO と地域住民が主体となって担当するシステムで構成される。これにより、管理運営の全体像と役割やミッションが明確になるだけでなく、このプロジェクトにかかわっている関係者同士での情報の共有化が進み、システム的な環境管理能力の育成の場となることが期待できる。

⑤ 都市緑地の環境経営モデルの提案

近年、都市緑地の維持管理に NPO が参画する事例が増えている。これらの組織では、NPO が地域住民からの会費と行政からの助成金の交付を受け、資材の購入や技術者の借り上げなど都市緑地の維持管理事業を運営している。これは、環境という“資源”をもとにして、都市緑地が持つ効用を次世代に渡り維持管理していくという新しい概念の経営形態である。しかし、現在、環境質そのものを経営資源として都市緑地整備から維持管理までを検討した事例はほとんどない。そこで、本論ではクールアイランドを効果的に機能させるとともに、都市緑地整備や維持管理コストと地域住民のニーズを両立させる都市緑地のあり方を導出する都市緑地経営モデルについて検討した。都市緑地経営モデルは、利潤の配分法や運営組織を考慮し、NPO を想定して利潤を必要としないモデルと、一般企業を想定した利潤を必要とするモデルに分け分析を行う。前者は費用対効果の均衡点から、後者は需要と供給モデルの均衡点からそれぞれ土地被覆の最適な配分を選定するとともに、都市緑地を整備する際に地域住民の負担額や得られる効果が把握できる。

本論は、ヒートアイランド問題に配慮した都市緑地整備計画立案の新たな意思決定支援の一つのモデルとして、さらに、ここで提案した持続的・自立的な都市緑地の環境管理・経営モデルは、行政や NPO などがクールアイランド効果に配慮した新しい緑地管理計画を検討する際の一つのスタンダードとして意味を持つものと期待したい。

第1章 はじめに

1.1 本研究の目的

近年、都市のヒートアイランド現象が新たな社会問題となりクローズアップされ始めている。ヒートアイランド現象とは、都市及びその周辺の地上気温分布において、等温線が都心部を中心として島状に市街地を取り巻いている状態を指し、夏季の局地的な異常高温化による生活空間の環境悪化にとどまらず、局地的な気象変化に伴う集中豪雨により社会インフラの一部が破壊されるなど、都市における新しい社会問題の一つとしてクローズアップされている。現在、ヒートアイランド対策は人工排熱の削減、地表面土地被覆の改善などが提示され実施に移されているが、ヒートアイランド現象を緩和する上で熱環境緩和効果を効率的・効果的に得るための施策の抽出が不可欠となってきた。ヒートアイランドは夏季の高温化に問題の所在があり、都市を緑化することにより緩和することができる。都市緑化政策は、大別して建物緑化、道路緑化と都市緑地設置の3つが提示されているが、持続可能な社会の形成の必要性が問われる中、都市気候を緩和し市民と生態系を融合させる貴重なパーツであるだけでなく、都市景観的機能、都市防災的機能等の様々な効果をもたらす都市緑地の整備に国および地方自治体が注目し、新たな環境施策の要の一つに位置づけられるようになってきている。しかし、近年の逼迫した厳しい財政状況の下、都市緑地整備関連の公共事業には透明性、客観性がより求められ、事業の目標や目的及び有効性・効率性を明らかにした上で、市民の参画を得た合意形成を図るプロセスにも関心が集まっている。我々の身近な緑地が持つ気候緩和効果への期待が高まっており、クールアイランド効果を最大限に発揮する都市緑地整備計画の立案と効果を維持する地域環境管理のモデルを具体的に提案する応用実務的な研究に着目した。この課題を解決するためには、既往研究の成果を踏まえた上で、都市のクールアイランド現象のメカニズムと効果を明らかにするとともに、都市熱環境の定量化から予測、環境経済評価そして環境管理までの一連の流れをプロジェクトのサイクルに沿って明確にする必要がある。

本研究のコンセプトは、都市環境（クールアイランド）に配慮した持続的な“環境インフラ整備計画”（都市緑地）と“環境マネジメント”（維持・管理・運営）を有機的に組み合わせ、政府や地方自治体を中心となって検討している“環境政策”（ヒートアイランド対策）に本研究の成果を反映させる三位一体のプロジェクト

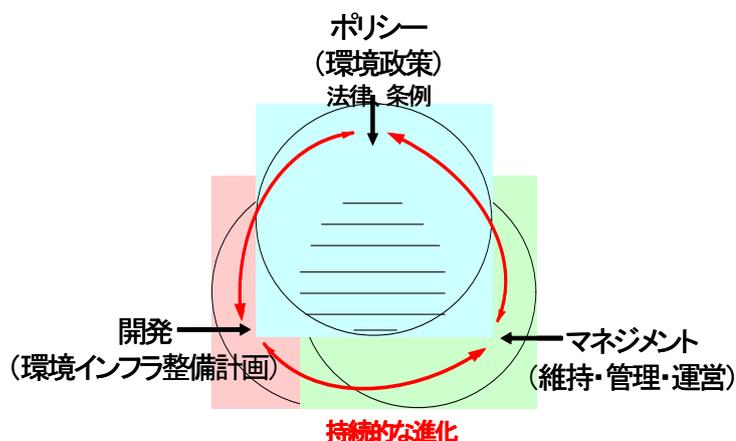


図 1.1-1 環境政策における三位一体のプロジェクトサイクル
(本研究のコンセプト)

ェクトサイクルに着目している。具体的には、現在都市域で進行しているヒートアイランドを緩和する効果を有する都市緑地のクールアイランドの実態とメカニズムを明らかにし、潜熱フラックスの視点からクールアイランド効果を定量的に評価することから、クールアイランド効果に配慮した都市緑地の整備計画や維持管理運営のモデルを提案することを目的としている。

なお、本研究で対象とする都市緑地は、基幹公園、大規模公園、緩衝緑地、都市林、緑地、広場公園など都市域に分布する公園緑地である。

1.2 研究背景

1.2.1 地球温暖化の実態

地球の表面から上空 800km~1000km までは大気圏と呼ばれ、主に窒素や酸素、二酸化炭素などから構成される。太陽から地球へと放射された光は、地表での反射や輻射熱（主に赤外線）として最終的に宇宙に放出されているが、大気中には赤外線を吸収する気体があるために、地表から放出される赤外線のうちの何割かを吸収して大気を温めている。この大気圏を構成する気体の構成が 1000 年の時間スケールでほとんど変化しないことにより、地球の平均気温を平均 15℃程度に保つ大きな役割を演じている。

しかし、20 世紀における急速な産業活動の進展により、人類は物質的に豊かな生活を獲得し、その一方で地球温暖化を引き起こした。地球温暖化とは、CO₂ や CH₄ 等の温室効果ガス（Green House Gas : GHG）などが大気中に大量に放出されることにより、地表面からの赤外線を過剰に吸収し、地表及び大気の温度が追加的に上昇させている現象である。2001 年に提出された「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」の第 3 次評価報告書¹⁾によれば 1880 年以降の地球全体の温暖化速度を見ると、1880 年から 1970 年までは地球全体で約 0.6℃/100 年であるが、1970 年以降は約 1.7℃/100 年と約 2.8 倍の速度上昇が見られる（図 1.2-1）。これは、地球規模の経済発展や経済のグローバル化の進展と期を一にしている。さらに、何も温暖化対策が行われないと仮定した場合、地球全体の平均気温は、GHG 排出シナリオにより異なるが、1990 年から 2100 年までの間に 1.4~5.8℃上昇し、平均海水面が 0.09m~0.88m 上昇すると予測されている。温暖化による社会的な影響は、干ばつ、洪水、熱波、雪崩、暴風といった極端な気候現象の多発とグローバル水循環システムの変化、農作物の収穫変動、生態系への影響、人類の健康に対する影響などが予測され、地球規模の温暖化対策の実施が急務となっている。

地球温暖化は、19 世紀後半からその問題の所在が確認されていたが、本格的に討論が始められたのは 1980 年代からである。1988 年には IPCC が発足し、世界各国で地球温暖化現象の実態や社会的影響などが討論され、地球温暖化の予測や対策等に関する世界各国の科学的・技術的研究成果の収集分析を開始した。それを踏まえ、気候変動枠組条約を採択し、先進各国は、2000 年までに温室効果ガス排出量を 1990 年の水準に回帰させる政策を講じることが合意された。その後、1997 年に京都議定書が採択され、先進各国は 2008-2012 年の

5年間に、日本は1990年時点より6%、米国は7%、EUは8%、それぞれGHG排出量を削減させることが合意されるとともに、共同実施、クリーン開発メカニズム、排出量取引などのGHG排出削減に関する経済的手法が提示された。京都議定書は、2004年にロシアが批准を表明したことにより計画フェーズから実施フェーズへと移行し、世界各国はGHG削減政策の実施が急務となっている。

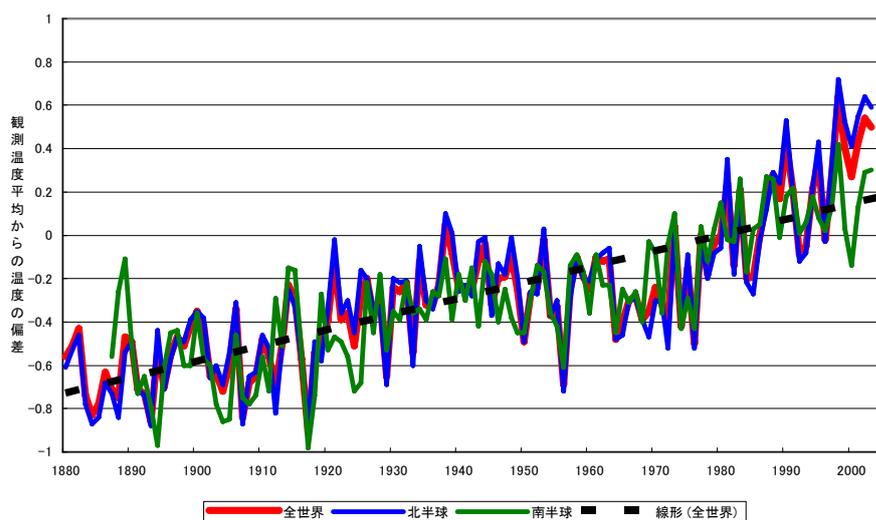


図 1.2-1 地球全体の平均気温の変化（1880年～2003年）¹⁾

1.2.2 都市温暖化（ヒートアイランド）の実態

日本や欧米などの先進国では、国民の70%以上が大都市に居住しており、ヒートアイランドや大気系を含む水循環システムの変化を始めとする都市でのエネルギー・水環境の変化を無視することができなくなっている。

(1) ヒートアイランド

都市気候のなかでも最も注目されているのがヒートアイランド現象である。19世紀の初頭、ロンドンにおけるハウードの観測により始めてヒートアイランドの存在が認められた。その後、ニューヨーク、セントルイス、シンシナティ、カルガリーなどの世界の都市のみならず日本の代表的な大都市でも都市の熱環境変化が問題となり調査研究が行われているが、その研究のほとんどがエネルギー問題として捉えたものであり、都市インフラの総合的な再構築に係わる問題として研究されたものは例が少ない。

図 1.2-2 に、東京都 23 区及びその周辺のアメダスによる夏季の典型的な夏日(97年～99年にかけての太平洋高気圧に覆われた晴天、弱風日)の気温分布を示す²⁾。

東京地域では、10時に練馬区から埼玉県境にかけて高温域が現れ、昼間(14時)は全体的に高温となっている。夕方(18時)には内陸の埼玉・群馬県境付近に高温域が残り、夜(22時)には都心部の高温域が目立っている。東京における特徴はこの高温域の島が明瞭に朝方

まで続くことにある。また、夜から朝にかけての東京中心部と都の周辺では2℃ほどの気温差がある。表 1.1-1 に、気象庁が統計をとり始めてからの日本の大都市における平均気温の上昇量を示す。東京などの大都市圏ではデータ供用開始時点から現在までの年平均気温の上昇量は2.3℃/100年～3.0℃/100年と温暖化の傾向が見られているが、気温上昇は1月（冬季）が8月（夏季）よりも速度が大きくなっている特徴がある。

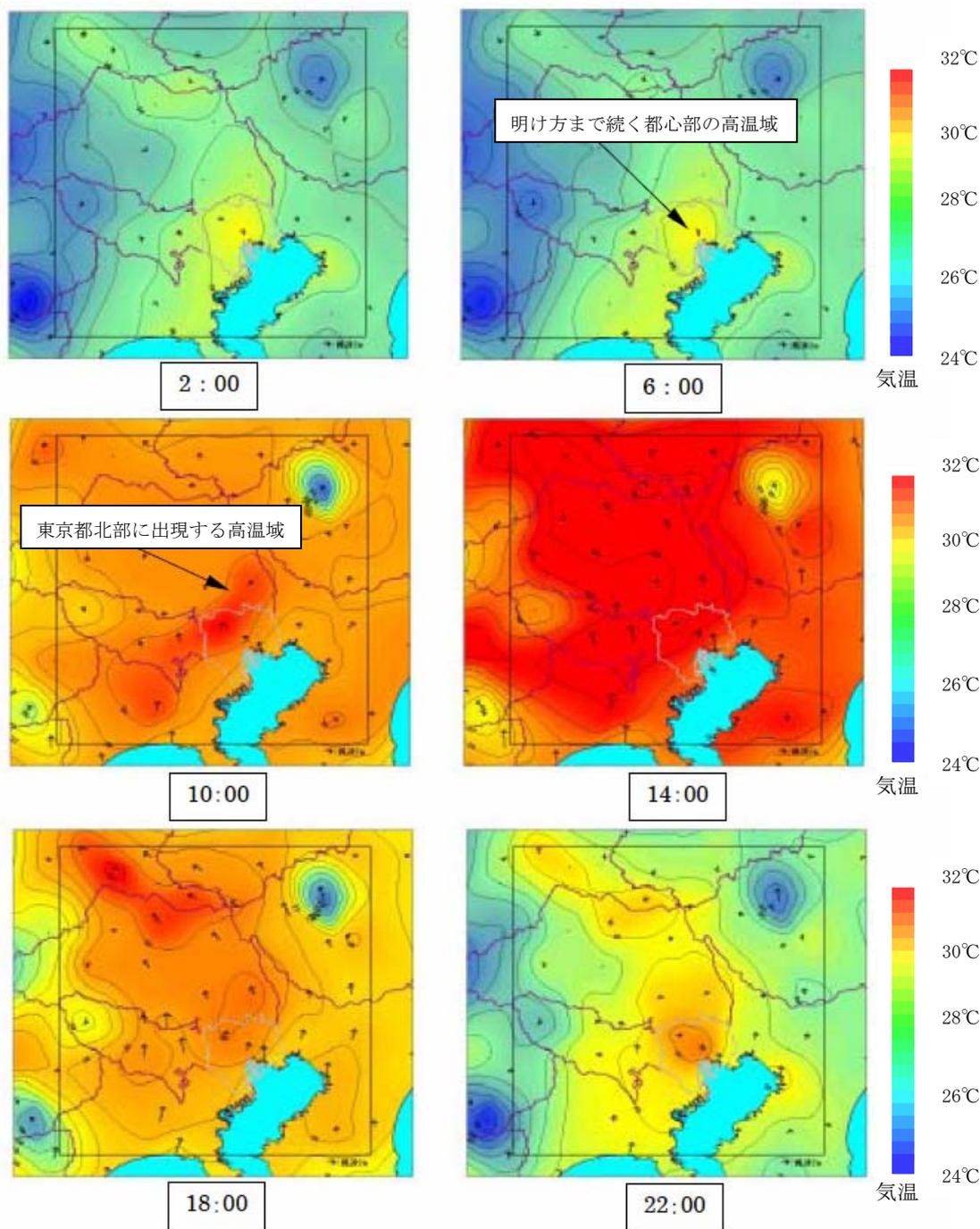


図 1.2-2 東京都 23 区及びその周辺のアメダスによる夏季の典型的な夏日 (97 年～99 年にかけての太平洋高気圧に覆われた晴天、弱風日) の気温分布²⁾

表 1.2-1 日本の大都市における平均気温の上昇量

地点	調査開始年	100年あたりの上昇量 (°C/100年)		
		平均気温		
		年	1月	8月
札幌	1901年	+2.3	+3.0	+1.5
仙台	1927年	+2.3	+3.5	+0.6
東京	1901年	+3.0	+3.8	+2.6
名古屋	1923年	+2.6	+3.6	+1.9
京都	1914年	+2.5	+3.2	+2.3
福岡	1901年	+2.5	+1.9	+2.1
大都市平均		+2.5	+3.2	+1.8
中小規模の都市平均		+1.0	+1.0	+1.0

気象庁 AMeDAS 統計データより作成

(2) 都市のエネルギー消費と人工排熱

地球温暖化の原因の主要なものには二酸化炭素(CO₂)すなわち化石燃料系の人工排熱の増大による地球規模の温室効果で、都市ではエネルギーが集中的に利用され、日本の一次エネルギー投入量の60%は人工排熱として集中的に都市の大気中に放出され、これが温暖化の一つの原因になっている。人工熱発生量とその地域の日射エネルギーの平均値との比を主な都市について計算してみると、ニューヨーク(マンハッタン地区)が6.8、モスクワが3.0、西ベルリンが0.37、東京(23区)が0.3となり、特にニューヨークでは太陽日射量の7倍近くの人工熱が集中的に発生していることがわかる。東京でも23区平均が0.3であり、局所的には太陽日射量より大きいところが存在している。人工排熱が環境に放出されるエネルギーが、大部分の首都圏の主要都市において太陽日射量とほぼ同レベルにまで増加してきており、都市の規模が大きくなるほど、より多くのエネルギー消費と人工排熱が発生する傾向にある。

1.2.3 地球温暖化問題とヒートアイランド問題の視点

今世紀に入ってから急速な産業と経済の発達に呼応する都市への人口集中と都市機能の集約の結果、都市での人間の生産及び消費生活が促され、人工熱の集中的な排出や都市表面性状改変による都市大気温暖化、日射量及び湿度の減少、降雨量の増加、エアロゾルによる大気混濁度の増加、風系の変化など、都市特有の気候、すなわち「都市気候(urban climate)」が発生するようになった。過去100年間の地球とヒートアイランドの度合いを年平均気温の視点で比較すると、地球温暖化は0.6°C/100年であるのに対し、大都市東京では3.0°C/100年である。すなわち、ヒートアイランドのスピードは地球規模の熱環境変化に比し5倍程度大きい。この温暖化の速度は、日本において高度経済成長の時期である1970年代後半から顕著となっており、高度経済成長による都心部への急激な人口増加や工業・産業の集中化が都市の温暖化を促進させている。

地球温暖化現象とヒートアイランド現象の問題の特徴およびその影響度を比較すると、地球温暖化は、人類のさまざまな生産活動（たとえば、運輸、産業、農業など）に伴って発生するCO₂に代表されるGHGが大規模に大気中に放出させることにより、これまでバランスが保たれてきた地球全体のGHG放出-吸収のバランスが崩れたことが原因である。よって、地球全体のスケールで現象が進行しているため、地球温暖化は地域を問わず地球規模で影響が及ぶ。これに対し、ヒートアイランド現象の原因としては都市化があげられる。都市圏に人口が集中することにより都市中心部でのエネルギー消費量（ビル、家屋、自動車など）が増加するが、その際に副産物として熱を大気中に放出する。また都市化はこれまで森林や水面、農地であった地域をコンクリート・アスファルトへと土地被覆の変化を促進させるが、この土地被覆の変化は顕熱フラックスを増加させ潜熱フラックスを減少させる。この人工排熱の増加と顕熱フラックスの増加、潜熱フラックスの減少により、都市の気温は上昇する。この現象は、大都市のみならず地方の中小都市でも確認されている。よって、ヒートアイランドは都市部において特徴的に出現する現象であり、エネルギー消費が少なく土地被覆の変化が少ない農村部ではヒートアイランドはほとんど発生しない。ヒートアイランドは、地球温暖化による影響（地球規模の気候変動）の上に成立する局所的気候変化であると考えられる。

このことから、地球温暖化対策とヒートアイランド対策は、効果的な対策の種類やその実施対象が異なる。地球温暖化対策の基本は、主要因であるGHGの排出を削減することである。これは、GHG排出が多い石炭・石油の消費抑制策が主となり、省エネルギーの促進や太陽光発電の促進などの新エネルギーの利用などエネルギー政策の改善、炭素税に代表される経済的な政策などが効果的である。この政策は、国家規模だけでなく地球全体が同時に取り組むべきとなる。なお、森林の保全・育成は短期的（100年単位）に見ると樹木の光合成作用によりCO₂吸収源として効果的である。しかし、長期的に見ると利用後の焼却時もしくは腐敗時にCO₂が大気中へと再放出され収支的に0になるため、森林伐採後の植林を徹底させるなど森林管理を適正に実施し、CO₂吸収源である森林を後世にわたり持続させる必要がある。これに対し、ヒートアイランド対策の基本は、エネルギー排出抑制と地表面土地被覆の改善が柱となる。前者は地球温暖化対策と同様に省エネルギーの促進や新エネルギーの利用などのエネルギー政策、後者は舗装道の改善や都市緑化が有効である。ヒートアイランド対策は都市域において実行することに効果としての意義があり、郊外で実施してもヒートアイランドは都市域においてあまり解消しない。このように、ヒートアイランド問題は、地球温暖化問題と比較して都市の局所的な問題であることに留意して対策を検討する必要がある。

1.2.4 ヒートアイランド対策の着目点

ヒートアイランド現象が進行することによる影響としては、夏季には都市気温の局地的高温化と熱帯夜の増大や冷房用電力消費の増大、都市部において短時間に記録的な雨量が深

夜や早朝にかけて降り洪水被害が増加するなどの影響が挙げられる。冬季には電力消費量（人工排熱量）が最大となり、気温のベースラインが上昇し、暖冬化を促進するなどの影響が懸念されている。

ヒートアイランド現象が発生することにより生ずる社会的・経済的な影響を季節別に見てみる。はじめに、夏季におけるヒートアイランド現象の特徴は、昼間に気温が上昇すること及び夜間の熱帯夜の増加が挙げられる。これにより、都心部の高温化が進むと人間はその不快さを解消するために冷房を使用することになるが、冷房の効果が下がるため冷房の設定温度を下げる。この時、エアコンの使用効率も下がるから、通常よりもエネルギーを多く使用することになる。また、ヒートアイランドは夜間の気温の上昇を促進するため、冷房使用する時間も増加する。これにより、屋外への排熱が増加し（人工排熱）、都市をより高温化させるようになり、また冷房の使用時間が増加するなど悪循環に陥る。夏季のヒートアイランド現象による問題点としては、コンクリート・アスファルト化による輻射熱の増加（顕熱フラックス）が指摘できる。高度成長期からの都市域のコンクリート・アスファルト化（人工化）は、近年急速化かつ大規模化している。東京都(2002)によると、東京都23区のうち約77%は宅地や道路等で構成されているとの調査結果があり³⁾、東京都区部全体が熱の吸収源であり放出源となっている。環境省(2001)によると、夏季の日平均顕熱フラックスは $90.5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ であり⁴⁾、人工排熱の $26.9\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ の約3.4倍となっており、夏季のヒートアイランドを抑制する手段を検討する場合、夏季の顕熱フラックスをどう少なくするかを検討する必要がある。

次に、冬季におけるヒートアイランド化の影響を見てみると、冬季におけるヒートアイランドの特徴的な傾向としては、日最低気温の上昇が挙げられる。12月における東京都の平均気温の上昇速度は、100年で 5.61°C である。気象庁(2004)による東京都における冬日（日最低気温が 0°C 以下）の年間の日数を比較すると、明治初期には年間50～100日発生しているが、ここ10年間は5日以下との調査結果があり⁵⁾、冬季の平均気温の上昇は朝の最低気温の上昇によることが挙げられる。

中部ニュービジネス協議会(2004)は、東海地方における気温とエネルギー消費量の関係を調査した結果、冬季は気温が上昇すると電力消費量は小さくなり、夏季には気温が上昇すると大きくなる傾向にあり、このことからヒートアイランドによる電力消費量の変化は、冬季の暖房負荷低減分より夏季の冷房負荷増加の影響が大きいことを示している⁶⁾。

以上を整理すると、ヒートアイランド現象の社会的な影響は大きく以下の2点が指摘できる。

- ・ 冬季における温暖化現象は相対的に実被害を伴うことは少なく、夏季の局地的な異常高温化が問題である。
- ・ 夏季の高温化の主要因は、人工排熱の増大よりも、顕熱フラックスが増加することにある。

1.2.5 ヒートアイランド対策としての都市緑地の重要性

顕熱フラックスの増加は、地表面土地被覆がコンクリート・アスファルト化すること及び森林や水面の減少により発生する。よって、ヒートアイランド問題に対しては、顕熱フラックスを削減する対策である屋上緑化・壁面緑化、街路緑化や保水性舗装・透水性舗装の導入による地表面温度上昇の抑制、水辺の確保などが効果的である。

地球的な環境問題の高まりとともに、都市整備にも新たな視点が求められている。都市環境という大きな制約に対して、都市の経済発展とより快適で便利な市民生活の実現という地域的目標をどのような形で環境と調和させるとよいか、その基本的な考え方と具体的な技術手法が問われている。建設行政の柱は、活力ある経済社会の建設と、安全でゆとりと潤いのある均衡のとれた国土の建設にあった。しかし、地球規模で広がる環境汚染、環境破壊への対応がクローズアップされたのに伴い、自然を健全に保ちながら豊かな生活環境を創造する施策へと、微妙に変化していきっている。都市の社会資本整備事業を推進するうえで、環境との共生を必要とする領域が次第に大きな広がりを見せてきている。欧米諸国に比べてまだ見劣りがすると言われる我が国の都市基盤施設や住宅の整備にあたって、都市環境に対する配慮を徹底させた良質の資本ストックを形成することは、都市の健全な発展と地球環境の調和の両面を達成する上での大きな可能性を開くものである。しかし、ヒートアイランド問題は、われわれの経済活動、日常生活のあらゆる側面と広く深く結びついた問題であり、特定の技術や施設整備によって一挙に問題が解決するわけではないことも認識する必要がある。住宅、ビル、各種都市基盤施設、緑地造成などのハード面のみならず、ライフスタイルや交通システム、適切な緑地や水辺の管理などソフト面も含めて、市民（消費者）、企業、行政による幅広い取り組みが計画的に統合されて初めて、都市環境の改善につながるマクロな効果が発揮できる。

その中で、都市緑地の設置は、ヒートアイランド問題に有効な対策として位置づけられるだけでなく、安全、ゆとり、潤いのある均衡のとれた国土が実現できる政策的なパーツとして近年特に注目されている。

都市緑地は様々な環境改善効果を有している。都市緑地の環境改善効果を例示すれば、CO₂固定効果や空気浄化効果、生態系の創出効果、地域住民のリフレッシュや景観向上効果などが挙げられる。都市環境改善のための「道具」として見た場合、他の人工的な道具は一つの機能を効率よく発揮するように作られているのに対し、都市緑地は幅広い効果を薄く発揮するような道具であるだけでなく、生態系の創出効果やリフレッシュ効果など他では代用できないような効果も有している。さらに、運用に際してほとんどエネルギーを投入する必要が無く、維持管理がシンプルで容易であること、そしてパーツとしての寿命が世代を超えるほど長いことも特徴に加わる。都市熱環境における都市緑地の効果としては、日射の遮断や蒸発散作用等によりクールアイランドとよばれる冷涼な空気のかたまりの場を形成するとともに、風道に配慮すれば大規模な緑地や海面からの冷涼な空気の移動をスムーズにし、昼間に熱の発生源となりかつ夜間に気温が下がりにくい市街地において日射

の遮断や冷気の形成等により気温を低減する効果が挙げられる。よって、水辺空間を含む都市緑地の整備は、水面や樹木自身が持つ気候緩和効果により周辺地区の夏季のエネルギー消費を抑え、都市気候を緩和する重要な施策の一つとして考えられている。

1.2.6 都市緑地の整備と管理・運営における現状の問題点と課題

従来までの経済成長型社会では、都市緑地はシビルミニマムな量的整備が主体であり、マネジメント面では行政側による公共施設を“管理”するという概念が強かった。都市緑地は、数的目標のみが優先され、都市の貴重な緑資源や生態系を復元したり保全する視点が欠如しており、人間と緑のかかわりは無視されがちであった。また、行政による都市緑地の管理運営は、行政区域内全体の施設の管理を同じ水準・同じやり方で行なうことが原則であるため、画一的な対応になりがちで、利用者にとって必ずしも満足のいく状態になっていないことも多い。このため、都市緑地と住民の意識距離は次第に離れていき、都市の貴重なオープンスペースが無機的な空間と化している事例が増えつつある。これは、計画や整備、維持管理の各段階において都市緑地に対する明確なる戦略目標とポリシーが欠如しているためであり、成熟社会を迎えた現在、新たな視点の都市緑地の運営システムの検討も必要となっている。

近年、都市緑地を地域の環境資源としてより有効に活用するシステムとして、地域住民や行政、NPOなどの多様な主体が、都市緑地のビジョンを共有し、計画、設計、施工など各段階に参画し供用後は都市緑地を自立的・持続的にマネジメントする、三位一体型（「政策」、「整備」、「維持・管理・運営」）の環境マネジメント手法が注目されている。クールアイランド効果に配慮した環境マネジメント手法を実践するためには、クールアイランド効果を最大限に発揮する戦略的な都市緑地の整備方針を明らかにするとともに、持続型・自立型の環境管理モデルの提示が求められる。この場合、ヒートアイランドに関する既往研究の成果を踏まえつつ、一連の都市熱環境の定量化から予測そして環境経済評価までの流れを整理して都市熱環境管理の目的と目標を明確にする必要がある。

1.3 研究手順と論文の構成

本論は以下の内容により構成される（図 1.3-1）。

第1章では、地球温暖化やヒートアイランド現象の実態を示し、地球温暖化問題とヒートアイランド問題の論点の違いを明確にし、ヒートアイランド対策における都市緑地の重要性を明らかにした。さらに、都市緑地環境政策を展開していく上での基礎となる緑地評価手法の現状を整理し、都市熱環境緩和効果の評価の必要性について論じ、これらの背景を踏まえて、本論の研究の目的を明確化した。

第2章では、文献調査から都市気象を左右するヒートアイランド・クールアイランドのメカニズムを明らかにし、クールアイランド研究のトレンドと課題について整理する。また、クールアイランド効果を貨幣価値に換算する手法として既往文献から現状の傾向を整理し、本論の位置づけを明確にする。

第3章では、都市レベルの熱環境の実態及び「緑と水」が都市熱環境に及ぼす影響について、横浜市をモデルの対象として検討する。具体的には、人口300万の政令指定都市である横浜市を対象に都市計画土地利用情報から人工排熱を算出し、ヒートアイランドの原因の一つである人工排熱の分布特性と季節的な変動について整理する。また、GISと衛星リモートセンシング技術を用いて「緑と水」が都市の熱環境に及ぼす影響を予測するシミュレーション・モデルを策定し、具体的な緑化計画のオプションについて評価する。

第4章では、本論で取り扱うクールアイランド効果の内容を示し、都市緑地のクールアイランド効果の評価モデルの概要、検討手順を整理して提示する。

第5章では、クールアイランド効果を有する樹林地と芝地、浅い水面（30cm）、植生で覆われた水面、通常の水面の熱環境特性について、東京都多摩市の多摩中央公園と高知県南国市に位置する石土池を対象とした熱環境調査を実施し、熱収支式とパルク式により都市緑地のクールアイランド効果を評価する。

第6章では、多摩中央公園を対象地として、樹木1本が識別できる航空機MSS画像と地域レベルの熱環境調査結果をもとに、樹木の生長過程を考慮したクールアイランド効果の予測モデルを構築する。

第7章では、都市緑地のクールアイランド効果の評価モデルとして、環境経済学の概念の一部を導入し、都市緑地における樹林地・草地・水面からの蒸散量を貨幣価値に換算する。

第8章では、本研究で得られたクールアイランド効果の評価モデルを適用し、クールアイランドの視点を組み入れた都市緑地整備計画の立案支援モデルを検討し、クールアイランド効果を発揮させるための都市緑地の整備方針について論じる。

第9章では、都市緑地のクールアイランド効果を次世代にわたり持続させるため、三位一体（行政、地域住民、NPO(大学)）の新しい概念を導入した自立的・持続的な緑地管理運営システムのモデルを提案する。具体的なモデルとして高知県南国市に位置する十市パークタウンを選定し、石土池のクールアイランド効果を維持するための環境管理モデルについて検討するとともに、今後の都市緑地の環境経営の方向性について論じる。

第10章では、本論を総括し、今後の課題と研究の方向性を整理する。

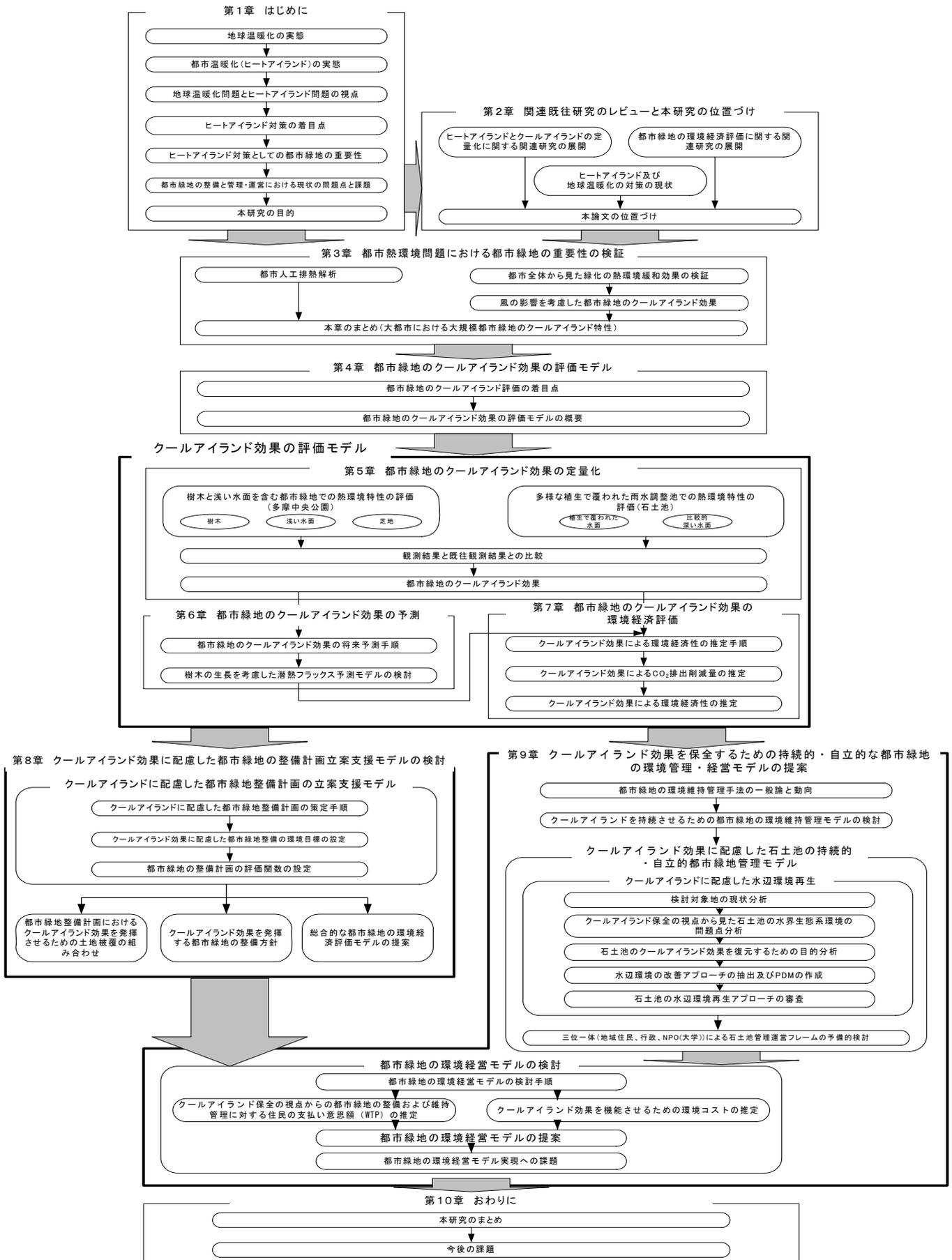


図 1.3-1 研究手順

第2章 既往研究のレビューと温暖化対策の現状の整理

本章では、ヒートアイランドやクールアイランド、及び都市緑地の環境経済評価に関連する既往研究を整理するとともに、現在国内外で実施されている熱環境対策について整理した。

2.1 ヒートアイランドとクールアイランドの定量化に関する関連研究の展開

2.1.1 ヒートアイランド現象のメカニズムの整理

2.1.1.1 ヒートアイランド現象のメカニズム

都市気候のなかでも最も注目されているのがヒートアイランドと呼ばれる都市の温暖化現象である。

図 2.1-1 にヒートアイランドのメカニズムを示す¹⁾。ヒートアイランド発生の要因には、

- 1) 工場のボイラーやビルなどの冷暖房、自動車からの排熱など、郊外に比べて都市域でのエネルギー消費（人工排熱）が際立って大きいこと。
- 2) 道路の舗装や緑地の減少、さらに下水道の発達により都市域からの水分の蒸発量（潜熱フラックス）が減少すること。
- 3) 都市構造物（コンクリート・アスファルト）の熱容量が大きいこと。
- 4) ビルなどの建造物によって地表面摩擦が増加して風が弱まること。
- 5) 二酸化炭素、水蒸気などの増加による温室効果。

等があり、複数の要因が複合的に作用してヒートアイランドが形成されると考えられている。ヒートアイランドの発生の要因は、ここにあげるよう種々考えられるが、大きく分けると都市でのエネルギー消費と市街地の開発による都市表面性状の改変である。要因の1)と5)は前者に起因し、2)、3)、4)は、後者に起因するが、いずれも人為的要因であり、その意味では、人工気象と呼べる現象である。

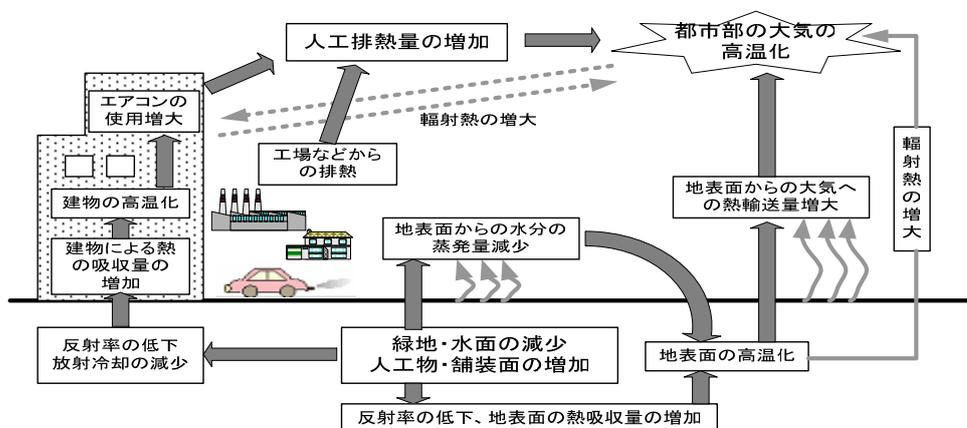


図 2.1-1 ヒートアイランド現象のメカニズム¹⁾

ヒートアイランド現象を定量化する際、以下の項目を検討する必要がある。

表 2.1-1 熱環境定量化項目

熱環境項目	概要	ヒートアイランド緩和効果	評価手法
顕熱フラックス	地表面周辺の空気塊が暖められ、対流活動により熱が上空に輸送されるエネルギー量	-	バルク式、渦相関法、シンプレーション法
潜熱フラックス	水を蒸発させるエネルギー量	+	バルク式、渦相関法、ペンマン法
人工排熱(顕熱)	人工的な作用(空調機器、発電所、車両等)により周辺空気が暖められ対流活動に使われるエネルギー量	-	エネルギー利用調査、既往調査事例
人工排熱(潜熱)	空調機器等から発せられる水蒸気が蒸発するエネルギー量	+	水蒸気量直接計測

2.1.1.2 熱環境(潜熱・顕熱)定量化手法

都市熱環境の定量化にあたっては、熱収支式を基本として、各項目の算定はバルク式を用いる手法が一般的である。地表面熱収支は次の式で表される(図 2.1-2)^{2),3)}。

$$R_n = H + IE + G \pm Q \quad \dots \dots (2-1)$$

ここで、 R_n は正味放射量、 H は顕熱フラックス、 IE は潜熱フラックス、 G は地中伝導熱、 Q は周辺空気塊からの風による移流である。

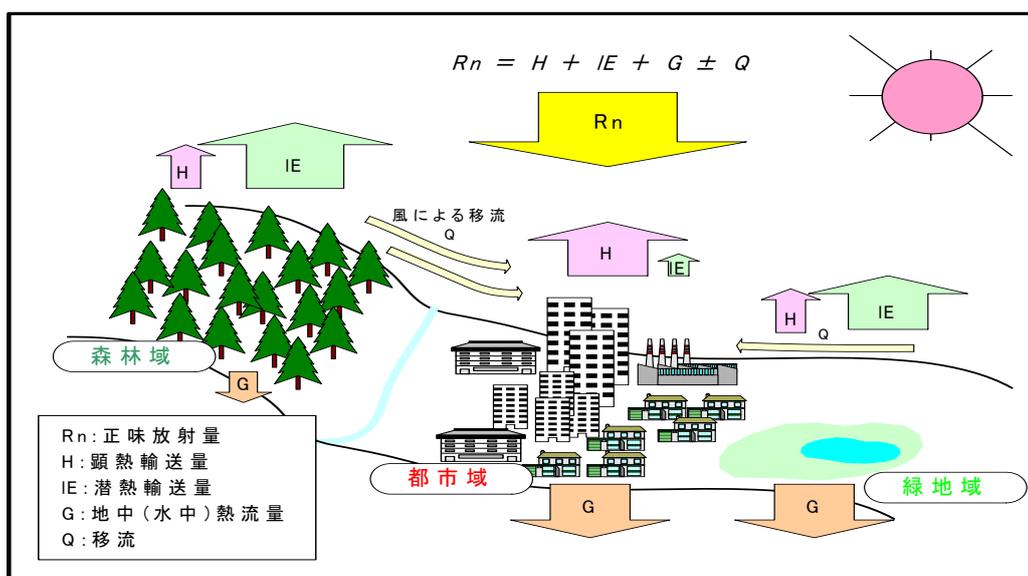


図 2.1-2 都市の熱収支概念図

なお、移流項は、他の熱収支項と比較して小さく、場合によっては省略することも可能である。一般に地表面が十分に湿っており、蒸発が自由に行われる状態であれば、潜熱フラックスは顕熱フラックスよりも多くなる。また、都市のような雨水浸透域の少ない（コンクリート・アスファルトに改変された）地域では、(1)式の右辺のうち H(顕熱フラックス)が卓越し、一方森林や水域では E(潜熱フラックス)が卓越している。

水を蒸発させるエネルギー（潜熱）と乱流や滞留運動によって熱が上空に運ばれていく熱量（顕熱）の推定法は、渦相関法やシンチレーション法などがあげられる。そのいずれの方法でも、基本となるのはバルク法である。

バルク法とは、地表面周辺において、上空と地表面の熱量の変化が気温差に等しいと仮定した場合に、地表面温度と任意の高度における温度と湿度、ならびにバルク係数から各種フラックスを推定する手法である。以下に、バルク法による顕熱・潜熱フラックス算定式を示す。

$$\frac{H}{C_p \rho} = C_H (T_s - T) U \quad \dots (2-2)$$

$$\frac{E}{\rho} = C_E (q_s - q) U \quad \dots (2-3)$$

$$\rho = 1.293 \frac{273.15}{273.15 + T} \left(\frac{p}{1013.25} \right) \left(1 - 0.378 \frac{e}{p} \right) \quad \dots (2-4)$$

ここに、 C_p ：空気の定圧比熱 $1005 \text{ (J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ 、 ρ ：空気密度、 C_H, C_E ：顕熱・潜熱に関するバルク係数、 T_s ：地表面温度 ($^{\circ}\text{C}$)、 q_s ： T_s に対応した飽和比湿 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、 E ：蒸散量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$)、 U ：代表点風速 ($\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$)、 T ：代表点の気温 ($^{\circ}\text{C}$)、 q ：ある高度の比湿 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、 p ：代表点の大気圧 (hPa)、 e ：水蒸気圧 (hPa) をあらわす。

なお、顕熱フラックスのバルク係数については地表面温度に依存し、潜熱フラックスのバルク係数は比湿に依存する。

$$C_H = \frac{k^2}{\ln[(z-d)/z_0] \times \ln[(z-d)/z_T]} \quad \dots (2-5)$$

$$C_E = \frac{k^2}{\ln[(z-d)/z_0] \times \ln[(z-d)/z_q]} \quad \dots (2-6)$$

ここに、 z_0, z_t, z_q ：風速・気温・比湿分布に対する地表面の粗度 (m)、 d ：植生地などで地表面の基準を修正するゼロ面変位 (m)、 k ：カルマン定数 (0.4：一定) をあらわす。一般に、水面においては $C_H \doteq C_E$ である。

2.1.1.3 都市の人工排熱の定量化手法

人工熱排出量の解析には、従来、消費エネルギー用途別原単位に数量である基礎指標を乗じて計算する方法（以下、原単位法という）がとられ、それによって人工熱排出量やその地域分布、等を求める手法が一般的である。

人工排熱の評価法としては、近年各都道府県で整備が進められている都市計画GISより建築用途別の土地利用面積を抽出し、単位床面積当たりの排熱原単位を組み合わせ、人工排熱量の地域的な分布および量的な評価を行なう（図2.1-3）。

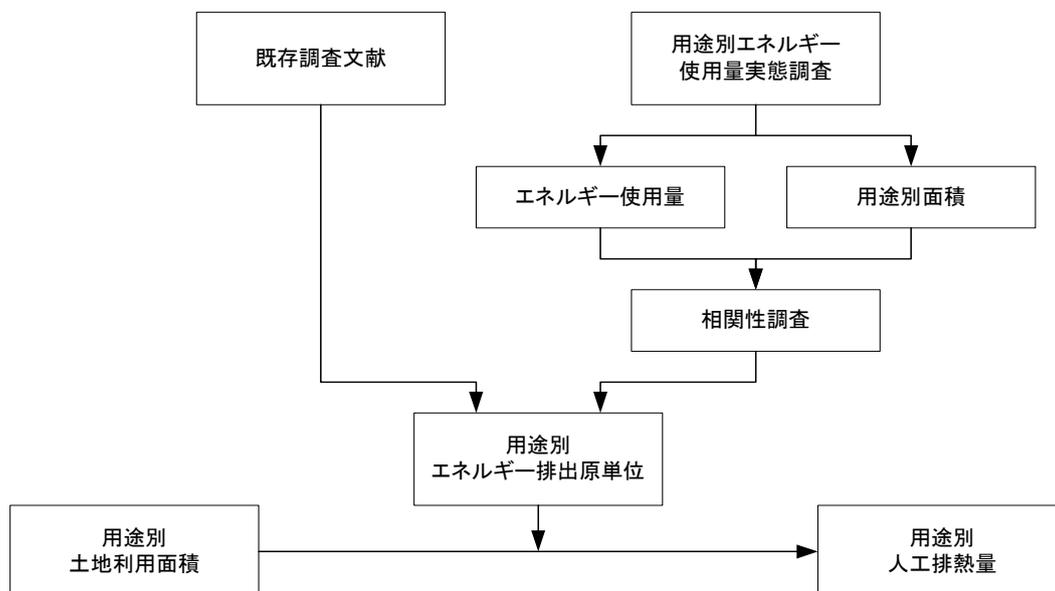


図 2.1-3 人工排熱量算出手順

近年、地方自治体などでは、建物用途別の床面積や土地利用面積の GIS 整備が進んでおり、一部のデータに関してインターネット上などで公開されている。これらの情報を入手することで、都市の人工排熱解析が容易になっている。

2.1.2 ヒートアイランド現象に関わる既往研究のレビュー

本項では、ヒートアイランドに関する既往研究を、ヒートアイランドの実態、ヒートアイランド現象の定量化手法、蒸散量の推定法に区分して整理した。

2.1.2.1 ヒートアイランドの実態に関する研究事例

ヒートアイランド現象は、大都市のみならず地方の中小規模の都市でも発生している。ヒートアイランド強度は、都市の規模によってあまり変化が見られない。

三澤(2000)は、東京都を対象に気温の永年変化を1901年から1998年まで約100年間の時間スケールで調査を実施し、11年移動平均で検討した場合、100年間で平均気温は2.0℃、日最高気温は0.7℃、日最低気温は2.8℃上昇していることを示しており、都市部では特に日最低気温の上昇が著しい⁴⁾。

武市(2002)は、高知県南国市を対象に1999年11月から2000年8月にかけて熱環境現況調査を実施し、南国市中心部では冬季(12月～4月)にかけて島状の高温域を確認しており、周辺部との温度差は最大4℃であることを示している⁵⁾。

また、他の都市におけるヒートアイランド強度は、越谷市の一部(人口74,700人)で5.5℃(榊原1994)⁶⁾、長野県小布施町(人口12,000人)で5.4℃(榊原1999)⁷⁾、豊橋市(人口352,000人)で5.1℃(西尾1997)⁸⁾、長野市(350,000人)で4.9℃(榊原ほか1998)⁹⁾、佐賀市(169,000人)で4.6℃(武市1996)¹⁰⁾、高知市(325,000人)で3.9℃(武市2000)¹¹⁾、長浜市(27,000人)で2℃程度(藤野ほか1999)¹²⁾となっており、都市の規模とヒートアイランド強度の関係はあまり相関性が見られない。

また、海外においては、李ほか(2000)は、中国上海市を対象に都市熱環境の実態を調査し、市街地面積が拡大したことに比例して夏季の平均気温と日最高気温が上昇したことなど新興国の大都市を中心に都市の高温化が進んでいる現状を示している¹³⁾。

2.1.2.2 ヒートアイランド現象の定量化手法に関する研究事例

ヒートアイランド現象を定量化する手法は、対象とする水平スケールにより適用する手法が異なる。都市レベルのような広範囲な地域の熱収支を検討する場合は、衛星データやAMeDASデータ、土地利用データなどのデータが整備されており、解析単位もこれらのデータにあわせた事例が多い。これに対し、解析が詳細になるにつれて、データの種類が膨大になるだけでなく高い精度のデータが必要となる。

尾島(1982)は、水平スケールを、10m程度の個々の建築物が分解可能なH(1)モデル、数100mの年の土地利用が分解可能なH(2)モデル、数kmの地方が分解可能なH(3)モデルに分割する試みをおこなっている^{14),15)}。

H(3)レベルでの解析事例としては、Bach(1970)は、1970年にCincinnati Cityとその郊外で同時に観測したデータを元に、都市環境を垂直方向にモデル化した。これは、日中に高温の都市中心部の上昇気流と郊外から流入する低速の風による循環流が形成されてい

ることを示している¹⁶⁾。河村(1992)は、相模湾と東京湾からの冷たい海風と都心部から移流される熱により収束帯が形成され東京都西部の環状8号線上空に雲が発生していることを明らかにした¹⁷⁾。田村(1999)は、地形、土地被覆、エネルギー消費に伴う熱放出を考慮した一日の気温や風の変化を計算できる三次元ヒートアイランド予測モデルを開発して、大阪市をモデルとして熱環境予測を実施し、省エネ技術や緑化した場合の温熱予測を行っている¹⁸⁾。

また、H(3)レベルのスケールでの解析には、衛星リモートセンシング技術が適用される事例もある。衛星画像には植生の活性度を計測するバンドや地表面の赤外放射輝度を計測するバンドが搭載されており、これが地域の熱環境を把握する上で便利である。

梅干野(2002)は、衛星リモートセンシング技術を用いて仙台市のビルや家屋の屋上の表面温度を計測し、大都市部でのヒートアイランドの実態を調査している¹⁹⁾。その他、金子(1994)、など、都市レベルでの植生量の変化や赤外放射輝度の解析に適用している²⁰⁾。

H(2)、H(1)レベルのような空間スケールでの熱環境予測は、近年、3次元の気流のシミュレーションによりヒートアイランド現象に伴う風の流れを再現した研究例が発表されている。

このなかで、Kimura(1991)は、大気の流れに対する人工排熱の影響を指摘し、観測された大気環境と同様の結果をシミュレーションによって再現することに成功しているものの、計算量の制約などにより草地、舗装面、屋根、水面などを水平面としてモデル化しており高さを有する建築物の影響をモデルに取り込むのは困難であるとしている²¹⁾。

H(1)以下のレベルでの解析方法は、1次元の熱収支モデルを用いた研究事例がある。複雑な形状分布を持つ建築物の影響を受ける気流に支配される熱の移流の効果が支配的な温熱環境の予測のためには、これらの1次元モデルの成果を流体モデルに取り込む必要がある。1次元モデルの研究事例としては、大黒(1989)による植物キャノピー内の風速分布を都市キャノピー層内に適用した事例がある²²⁾。

模型実験や現地気象観測による都市・屋外温熱環境の研究としては、村上他(1977)による一連の研究があり、地表面温度の影響、構造物と温度分布の関係が調査されている^{23),24)}。岡(1978)は、風洞中に発熱体を設置して熱拡散実験を行っており、風洞実験と同じ空間スケールの数値解析との比較をしている²⁵⁾。

現地気象観測による熱環境の計測事例としては、渦相関法による計測が一般的である。渦相関法とは、接地境界層にあつては乱れにより生起される渦が主として運動量、顕熱、潜熱を輸送することに着目し、鉛直風速、温湿度の時刻変動をサンプリング間隔で測定することで、直接的に顕熱フラックス、潜熱フラックスを捉えるものである。植松・片山ら(1998)は、渦相関法を適用して、1997年夏期に福岡都心部と約14km離れた郊外とで同時に40日にわたる渦相関法に基づく観測を実施している²⁶⁾。

これに対し、渦相関法が点レベルのみの熱環境特性しか計測できないことから、レーザー光が熱の対流により揺らぐ性質を利用したシンチレーションシステムの利用が注目されて

いる。神田ら(1997)は、シンチレーションシステムを平面に適用し、熱収支情報取得に対しての有用性を示している²⁷⁾。

2.1.2.3 都市の人工排熱とヒートアイランド現象との関係に関する研究事例

一般に、都市の発展に伴う熱環境的な負荷は、土地利用が改変することによる顕熱の増加と産業の発展に起因する人工排熱の増加が挙げられる。

人工排熱のヒートアイランドへの影響としては、環境省(2003)により東京都23区を対象に夏季(7月~9月)の平均気温と冷房等エネルギー使用量との相関性を検討した事例があり、冷房消費エネルギーの増加傾向の中で、減少あるいは極端に高い増加がある年は、平均気温が低い又は高い年と対応しており、冷房消費エネルギーが気温と密接に関係していることを示している²⁸⁾。また、Akbari et al(1992)は、1986年に米国を対象として電力消費量と気温との相関性を検討し、Washington Cityでは1°F気温が上昇すると電力消費量は100MWh上昇することが示されている²⁹⁾。

冷房等のエネルギー消費に伴う人工排熱がヒートアイランドの成因の一つであるが、一方で、ヒートアイランド現象が都市部のエネルギー消費を一層押し上げている2重の影響が指摘できる。

例えば、水島(2000)は、東京都23区を対象にエネルギー消費による人工排熱分布を比較検討したところ、新宿の高層ビル群における排熱量は住宅地である世田谷区と比較して約10倍多いことを示している。さらに、都心部のエネルギー消費量を50%削減した場合の気温低下量は最大0.7°Cと予測している³⁰⁾。また、Hassid(1998)は、ギリシャのアテネを対象に空調機とヒートアイランドの関係を調査し、ヒートアイランド現象は冷房に対するエネルギー需要を増大させていることを示している³¹⁾。

その他、人工排熱関連の研究事例としては、エネルギー消費量の産業別の分布傾向や地域比較、エネルギー消費量と室内温熱環境、家族形態との関係を調査した事例がある^{32)~37)}。

2.1.2.4 都市緑地とヒートアイランド現象との関係に関する研究事例

ここでは、都市緑地とヒートアイランド現象等の都市気候との関連性に着目した研究事例について整理する。都市緑地とヒートアイランドとの関係に関する研究事例は、緑地の熱環境緩和効果、水面の熱環境緩和効果、樹木の生長と熱環境との関係の3項目に区分することができる。

(1) 緑地の熱環境緩和効果の研究事例

緑地は、その蒸散効果により周辺の気温を低下させている。緑地とヒートアイランドに関連する研究事例は大きく分けて、森林や樹木の熱環境緩和の効果計測と森林の配置による熱環境の変化予測に分けることができる。

森林や樹木の熱環境緩和効果の評価に関する事例では、単木の気温低減効果を明らかにし

た研究として、萩島ら(1999)は、葉密度の異なるクスノキ・ケヤキを対象に熱環境調査結果より街路の放射環境に関する予測モデルの構築を行い、樹木内の表面温度軽減効果が大きく、高木で樹冠サイズが大きい樹木ほどその効果は大きくなることを示している^{38),39)}。

緑の量が都市気候に及ぼす影響を検討した研究を見ると、山田(1995)は東京都および埼玉県を対象に都市規模と緑被率との関連性を調査し、緑被10%あたり気温が0.2~0.3℃変化することを示すとともに、都市の人口規模が大きいほど緑地の気温低減効果が大きくなることを指摘している⁴⁰⁾。梅干野(2002)は、衛星リモートセンシング技術を用いて仙台市のビルや家屋の屋上の表面温度を計測し、大都市部でのヒートアイランドの実態を調査している。そして、断熱材の有無に関わらず屋上緑化を実施することにより、植栽なしと比較して表面温度が夏季で最大7.5℃低下するとともに、室内冷房機器使用量がビル1部屋(70m²)あたり5kW減少することを確認した¹⁹⁾。また、緑地の配置に関する研究としては、神田・日野(1990)は、植生・土壌の効果を考慮した2次元のシミュレーションにより、植生を分散させて配置した方が気候緩和効果は高いという結論を得ているが、構造物の影響を考慮しておらず、今後の課題としている⁴¹⁾。

(2) 水面のヒートアイランド緩和効果

水面のクールアイランド効果に関する研究事例としては、成田他(2001)は、隅田川を対象として河川水の周辺熱環境への影響を調査し、現地熱環境調査を熱収支もモデルに適用して、河川のクールアイランド効果は風下側300~400mに及ぶ距離まで影響を及ぼしていることを明らかにしている⁴²⁾。

また、湿地の熱環境に関しては、研究事例はほとんど存在せず、わずかに農業気象の分野で湿地とよく似た環境である水稻の熱収支を検討した事例が見られる^{43),44)}。

湖沼に関しては、中山(1993)が手賀沼を対象に熱環境調査を実施した事例があり、植生が繁茂した水面は、植生のない水面と比較して昼間の潜熱フラックスの増加が確認された⁴⁵⁾。

水面の熱環境緩和効果を潜熱フラックスの観点から比較してみると、植生>植生が繁茂した水面>植生のない水面の順となっている。水面を対象とした熱環境調査事例は、樹木の熱環境調査事例と比較して少ない。

(3) 樹木の生長と熱環境

森林が周辺の熱環境に与える影響は、絶えず変化しており一様ではない。これは、森林が永久不変なものではなく、成長や枯損によって更新され続けているからである。一般に、森林の生長モデルは、森林経理学の分野に属している。立木の効果的な収穫法や森林の保全計画を行う場合、今後の成長予想や収穫量の予測モデルの研究が行われてきた経緯があり、種々の直径・樹高の成長モデルが提案されている。樹高及び直径の成長モデルを見ると、樹高及び胸高直径とも若齢林では成長速度は急で、高齢林に向かうほど成長量は少なくなる性質を持っている。その関係はMitscherlichの法則に従っている⁴⁶⁾。

$$\bar{x}(t) = M(1 - e^{-kt}) \quad \dots\dots\dots (2-7)$$

ここで、
 \bar{x} : 林齢 t 年の時の胸高直径
 M : 最大胸高直径
 k : 勾配係数
 t : 林齢 (年)

しかし、式(2-7)は林木の平均の胸高直径成長曲線を表しているが、面的な情報収集手段である衛星リモートセンシングを用いた手法を検討する場合、むしろ水平方向への枝の広がりやを考慮に入れなければならない。

東ら(1994)は、山口県の演習林において、1987年5月7日観測のランドサット TM データを使用し、スギ、マツ、ヒノキの林齢と NDVI の関連について報告しており⁴⁷⁾、次のような結論を導いている。

- ① 植栽後 2,3 年未満の林地では、伐採直後の裸地状況が残るため、指標値は低い値を示している。
- ② 植栽後 5 年を経過すると指標値の上昇の伸びが鈍り始める。これは、徐々に樹冠が閉鎖しつつあるためである。
- ③ 25 年以上を経過すれば、指標値は一定の高い値をとる。これは、樹冠が完全に閉鎖し、上空からでは変化がとらえにくいものと考えられる。

筆者は、東らが計測したデータを解析し、山口県の演習林において計測されたスギ、マツ、ヒノキの林齢と NDVI との間には Mitscherlich の法則が成立することを確認している⁴⁸⁾。このことは、樹齢の表現する手段として胸高直径を用いることに問題が無いことを示している。これは、山口県での検討結果であるが、本関係は季節や地域性に違いがあっても、樹木の生長モデルを検討する上での重要な関係であると結論できる。

(4) 蒸散量の推定

蒸散量の計測方法は、1)樹木 1 本単位による調査手法としてはペンマン法、ヒートパルス法、蒸散速度を求める方法があり、2)広域の蒸発散を算出する方法としては、熱収支や水収支、衛星リモートセンシング技術より推定する方法がある。

ヒートパルス法は、樹幹にヒータを組み込んだ針を差し込み、1 秒前後発熱させる。ヒータの上方に 1 cm 程度離れたところに細い温度計を挿し、温度の伝播が樹液流で早くなることを用いて樹液流速を求める手法である⁴⁹⁾。

ペンマン法(Penman method)は、Dalton の輸送式と熱収支式を組み合わせ、2m 程度の高さの温度、湿度、風速と熱収支項(純放射量、地中熱伝導量)のデータから算定する手法である。基本的には日単位以上のデータが取得できる。水面からの蒸発位、または土壌の水分量が充分にある丈の低い草地などの蒸発散位を基本とする。灌漑排水・農業気象・

流域水文学等の分野で用いられている。なお、ペンマン法を一般化し、熱伝達に対する空気力学的抵抗、水蒸気伝達に対する拡散抵抗を盛り込み、空気力学的抵抗に植物の群落抵抗を加えることによって植生からの蒸発散量の算定を可能にしたペンマン・モンティス法 (Penman-Monteith method) も開発されている⁴⁹⁾。

水谷 (1992) は、熊本県阿蘇のスギ人工林を対象に、ヒートパルス法により蒸散量を推定し、11月の時点でスギの蒸散量を $1.31\text{mm} \sim 2.04\text{mm}$ との結果を得ている⁵⁰⁾。また、その他の事例として、森本による街路樹ケヤキの活性度診断や鈴木(1991)によるアカマツ・ヒノキの混交林を対象とした事例などがある^{51)~54)}。

ペンマン法を用いた調査事例としては、服部ら(1993)による、ヒノキ林を対象にペンマン法により蒸散量を推定し7月の $3.4\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$ の計測結果を得た事例がある⁵⁵⁾。

地域レベルの蒸散量を計測した事例としては、本條ら(1984)による東京都の各公園 (赤塚公園、小石川植物園など) を対象に、熱収支モデル用いて推定した事例⁵⁶⁾、近藤ら(1993)により、アカマツ林、カラマツ林、ヒノキ林を対象に熱収支式を適用した事例などがある^{57)~60)}。また、人工衛星データの植生指標を用いて地域の蒸発散量を推定する手法(岡田 1999 他多数) もあり、特に海外のように地表面データが少ない地域での適用が主となっている^{61)~65)}。

2.2 都市緑地の環境経済評価に関する関連研究の展開

2.2.1 環境経済評価の一般論

2.2.1.1 環境経済評価の概要

環境に対する諸政策を効果的・効率的に実施していくためには、予想される環境問題の種類を特定し、環境問題の発生メカニズムを解明し、環境変化の影響を評価することが必要である。環境経済学は環境にかかわる諸問題を経済的に評価する学問と定義しているが、栗山(2002)は環境経済学の検討範囲として以下の3項目を提示している⁶⁰⁾。

- ・ 環境問題の生じる経済メカニズムの解明

環境問題が生じる原因は、環境が無限であり価格がないものとして扱われてしまうところにある。環境経済評価を実施するにあたっては、地球温暖化、環境破壊、廃棄物問題などの現実的な環境問題を対象として、どのような形で経済市場の中で影響が生じるのかを分析している。

- ・ 環境変化の影響評価

たとえば、地すべりや土石流などの土砂災害が発生すると、その下流域においては家屋や田畑などに多額の損害が生じることが予想される。このような災害を抑止する際、上流部で砂防ダムなどの土砂流出対策が実施されることになるが、この場合、環境変化の損害額がどのくらいを示さなければ、事業の透明性や公平性を確保することができず、具体的な対策も進まない。そこで、環境経済学は、環境の持っている価値を金額で評価するための手法を開発している。

- ・ 環境対策を実現するための政策手段の提示

現在、地球温暖化対策においては炭素税に代表される経済的手法が検討されている。環境経済学は、都市緑化や排気ガス対策などのCO₂削減対策における効果とそれが社会に及ぼす経済的影響を計測することにより、効果的な削減対策の抽出を行う。

2.2.1.2 事業評価における環境経済評価の位置づけ

現状の環境経済評価に関しては、あまり熱心な取り組みがなされていないのが実情である。「環境は経済評価すべきでない」、あるいは、「環境は経済評価できない」といった論調が強まり、それが環境聖域説に拍車を掛けている。しかし、これは健全な評価の放棄に繋がるものであり、公共事業の透明性確保の観点からも、環境経済評価が不要であるという免罪符を安易に与えることは避けるべきである。そのためにも、例えばCVM（仮想評価法）を適切に適用した手法改善努力や、今後の新たな評価手法の開発に対する真摯な取り組みに期待するところがある。一般に、公共事業における環境経済評価は、公共事業を実施する際に波及するさまざまな便益を評価する際に用いられる場合が多い。図2.2-1に、公共事業における環境経済評価の位置づけを示す。

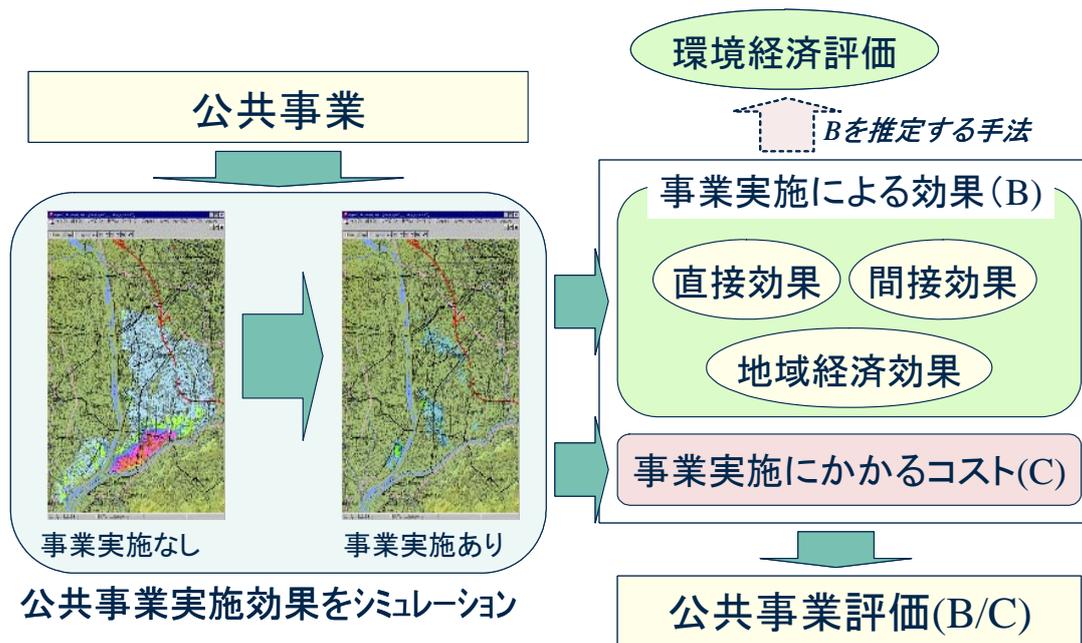


図 2.2-1 公共事業における環境経済評価

2.2.1.3 環境の価値の種類

現代の環境破壊をめぐる問題は、資本主義か社会主義かといったいわゆる経済体制の如何を問わず、富裕国においても貧困国に置いても無視できない重大な社会現象となるにいたっている。その意味では、環境変化は現代の経済社会が普遍的に直面している重要問題である。環境に対する価値は、利用価値 (use value) と非利用価値 (non-use value) に大別される。前者はその環境が提供されている場所を利用することによって発生する満足感であり、後者は受動的利用価値と呼ばれその場所を利用しなくても発生する満足感を意味する (図 2.2-2)。

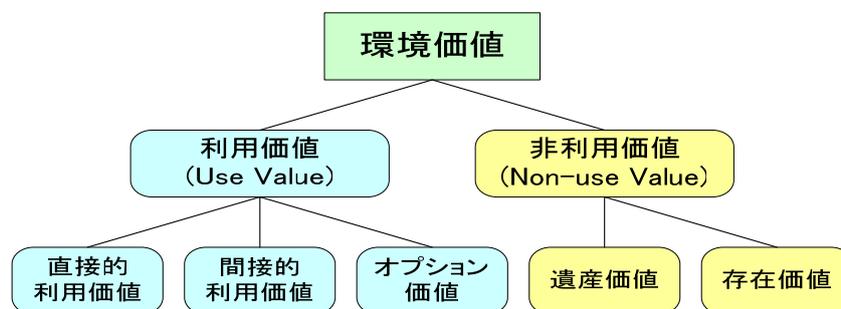


図 2.2-2 環境価値の分類⁶⁷⁾

2.2.1.4 環境経済の評価手法

環境経済の評価手法は、評価内容で分類すると、個別計測法と総合計測法に大別される⁶⁷⁾。前者は、間接効果が相互を打ち消しあうという理論に基づき、各項目への直接効果を個別に貨幣価値に変換して、これを合計する方法である。この方法の長所は具体性があるという点であるが、短所としては二重計測や計測漏れの恐れがあるという点が挙げられる。後者は、各項目への直接効果のみならず間接効果を総合的に計測する方法であり、長所短所は個別計測法と逆の特性を持っている。

一方、評価手法で分類すると、表明選好(Stated Preference: SP)法と顕示選好(Revealed Preference: RP)法に大別される。SP法は、アンケートによって個人の選好を直接的に尋ねる方法であり、RP法は、個人の行動結果から彼の選好を分析する方法である。表2.2-1に、環境経済評価手法の分類を示す。

表2.2-1 環境経済評価手法の分類⁶⁷⁾

	個別計測法	総合計測法
表明選好法 (SP法)	コンジョイント分析 旅行費用法 (事前評価) 離散選択分析 (事前評価)	CVM
顕示選好法 (RP法)	直接支出法 旅行費用法 (事後評価) 離散選択分析 (事後評価)	ヘドニック価格法 応用一般均衡分析

以下に、代表的な計測法について概要を示す。

代替法

代替法は、ある環境を再生する、あるいはそれと代替するものを生み出すためにかかる費用を、その環境の価値とする手法であり、公共事業の便益計測に多く用いられる。本手法は客観的な評価額が得られる半面、評価対象の自然環境に相当する私的財の存在が必要、評価対象となる自然環境が物理的にどれだけ存在するかを把握する必要などの欠点がある。

直接支出法

直接支出法とは、環境悪化によって被害を受ける個人または企業が被害を軽減するために要する支出額の増加分で計測する方法である。直接支出法は、環境評価にしばしば採用されるが、適用可能であるのは、支出による効果と環境が完全に代替関係にある場合に限られる。また、環境変化をどの段階の代替財に置き換えるべきか問題となる。たとえば、大気汚染を評価する場合、汚染物質が発生しないようにするための設備費用、発生した汚染物質を回収するための設備費用、汚染物質による被害から復元するための費用など複数の代替財が考えられ、さらに、置換の段階が後になるにつれて費用が大きくなるという傾向が見られる。

旅行費用法

旅行費用法(Travel Cost Method: TCM)の考え方は、1947年に米国内務省国立公園局からの質問に答える形で **Hotelling** によって初めて示され、屋外のレクリエーションサービスという環境質に適用されるなど、数多くの実証研究を通じて発展してきた。

旅行費用法の理論は、消費者余剰法を基礎とする。消費者余剰法とは、「消費者がその財を無しで済ませるくらいなら支払ってもよいと考える最大支払許容額の合計から、実際にその財の購入のために支払った金額の合計を差し引いたもの」で定義される。プロジェクトにおける消費者余剰を用いた便益は、図 2.2-3 中の財の価格が p^A (プロジェクト無しの場合の価格) から p^B (プロジェクトありの場合の価格) に低下した場合の $p^B p^A A B$ で示される台形増加分がプロジェクトによって生じた便益である。

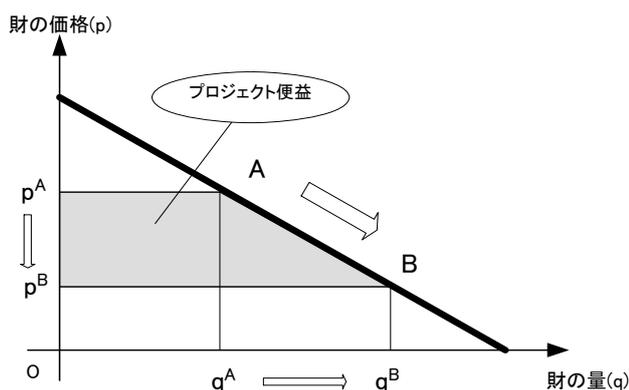


図 2.2-3 消費者余剰によるプロジェクト便益評価

仮想市場評価法 (CVM)

CVMは、人々に評価対象財について説明した上で、その評価対象財と引き替えに最大いくらまで支払ってもよいか (WTP)、もしくはその対象財を放棄する場合に最低いくらかの補償を受けたいか (WTA) を回答してもらい、財の価値を評価する手法である。この手法は、他の手法によって評価することができないあらゆる財の評価が理論的に可能であるという利点を有しているが、一方で、評価精度を疑問視する者も多い。CVMの質問形式は以下の4つに大別される。

- ① 自由回答方式：自由に金額を記述してもらう
- ② 付け値ゲーム形式：提示金額に対して賛成／反対の回答を求め、反対の回答が得られるまで金額を上げていく。
- ③ 支払いカード方式：選択肢の中から金額を選択してもらう。
- ④ 二項選択方式：提示金額に対して賛成／反対を選択してもらう。

ヘドニックアプローチ

ヘドニック法は環境条件の違いがどのように地価の違いに反映されているかを観察し、それをもとに環境の価値の計測を行う手法である。地価の差が便益に等しくなることは理論的に証明されているが、ヘドニック法が有効であるためには、生産者や家計の地域間の移動が自由で移動コストがかからない、土地市場が競争的である等の条件が成立している必

要がある。これらの条件は現実には必ずしも成立していないと考えられるものの、近似的に成立しているものも多い。一方、統計上の問題としては、地価関数の関数形を先験的に特定できないことの問題がある。

このため、ヘドニック法の実際の利用に当たっては、(1) 地価データをサンプリングする際に、評価対象プロジェクトと類似したプロジェクトが実施されてから十分に時間が経過している地点からサンプリングすること、(2) 同質のメンバーによって構成されている地域からサンプリングすること、(3) 不動産取引市場が競争的な地域からサンプリングすることが望ましいこと等に留意すべきである。また、統計処理においては、地価関数の関数形やその変数の選択にあたってできるだけ幅広く試行錯誤を行い誠実に選択し、その選択の理由を明らかにすることにより、調査の信頼性を確保することが重要である。

コンジョイント分析 (CA)

コンジョイント分析 (CA: Conjoint Analysis) は、計量心理学や市場調査の分野で発達してきた分野であり、仮想市場評価法 (CVM) と同様にアンケートによる評価方法である。コンジョイント分析は、多くの要因の組み合わせから構成される商品などの好き嫌いの程度が順序関係で与えられたときに、個々の要因の効果およびその同時結合尺度 (Conjoint Scale) を同時に推定することができる。アンケート調査などで商品の選好を尋ねる場合、その商品がどの程度好きなのかを尋ねるよりも、好きな順番を尋ねた方が被験者は答えやすい。こうして得られた順序データから、どの商品が好まれるのか、またどの要因が選好の判断に影響を及ぼしたのかを解析する手法がコンジョイント分析であるともいえる。

2.2.2 都市緑地の公益的機能の整理

都市緑地の機能は、その性格、重点の置き方、計画目的との関連性などによって幾つかの分類の方法がある⁶⁸⁾。

都市計画中央審議会の答申

都市計画中央審議会は、昭和47年4月に、主として都市緑地の性格に着目して次のとおり分類している。

- a) 道路、広場と一体となって都市の骨格を形成し、また、その外周にあって、市街地の無秩序な外延的拡大を防止する。
- b) 個性ある風致、景観を備えた地区環境を形成し、自然との触れ合いを通じて人間形成における情操、体育その他の教化的・保健的価値を有する。
- c) 公害及び災害の発生を抑止し、災害時の非難・救助活動に役立つとともに、大気の浄化、浮遊煤塵の捕捉、防音、遮熱などの機能を有する。

C.ターナード及びB.プシュカレフの分類

C.ターナードら(1966)は、主として緑地機能の性格に着目して以下のとおり分類している。

- a) 保護機能：自然状態を保護する。文化財を保護する。日照を確保し、騒音を防止し、類焼を防ぎ、プライバシーが侵害されることを防止するなど、個人の生活環境の破壊を防ぐ。
- b) 生産機能：農林業生産の場になる。観光自然としての源泉になる。教育的価値がある。
- c) 修景機能：住宅及び住宅地を美化する。都市全体の美的イメージアビリティを高める。
- d) リクリエーション機能：幼児の遊び場、青少年や青年のスポーツや交歓の場になる。主婦や老人の憩いの場になる。

都市計画の理念による分類

都市計画の理念は、安全性、健康性、能率性、快適性の4つの概念を矛盾しないよう結合することであると考えることができる。そこで、緑地の効果をこの4つの概念によって分類すると以下のとおりとなる。

- a) 安全性効果：洪水、浸水、崖崩れ、日射、強風などから人間や財産を保護するための緑地。地震火災の類焼を防止し、避難に役立たせるための緑地。騒音、振動、大気汚染等各種公害から人や財産を守るための緑地。
- b) 健康性効果：レクリエーションに役立たせるための緑地。都市気象を緩和し、住民の健康に好影響を与えるための緑地。
- c) 能率性効果：都市発展のためのフレキシビリティ（弾力性）を確保し、新市街地形成時の混乱を防止するための緑地。都市の土地利用や交通施設の合理的計画を可能にするための緑地。動植物園、墓園など特殊な需要を満足させるための緑地。
- d) 快適性効果：日照、都市美、混雑の緩和、コミュニケーション等に役立たせるための

緑地。歩行者や自転車の安全さと愉しさを増加させるための緑地。プライバシーを保護したり、人間の精神の安定性を高めたり、自然や文化財を保護するための緑地。

高原(1986)は都市緑地の機能を表 2.2-2 のように整理している。

表 2.2-2 都市緑地の機能⁶⁸⁾

機能		概要
自然災害保護	耐火・防火効果	都市において公園は広域な自由空間となり、火災の類焼を防止する イチヨウ等の樹種は家屋と比較して防火能力が高い
	洪水調節効果	森林はその保水機能により、洪水を調節する効果がある
公害保護	防音効果	樹木は周波数の高い騒音をよく吸収する特性を有する
	大気汚染緩和効果	大気中の汚染ガスを吸着する能力を有す
アメニティ	気温調節効果	樹木や水面が持つ蒸散能力により、緑地は周辺気候を緩和している
	防風効果	森林が風速を減殺し、寒風外を防止する効果を有する（国土緑化推進委員会）
修景	景観効果	緑地は都市のイメージアビリティを高めることに役立つ
リクリエーション	リクリエーション	地域住民の余暇生活空間としての公園
	健康性効果	住民の健康に好影響を与えるための緑地

次に、都市公園の種類については、国土交通省は大規模公園費用対効果分析手法マニュアルの中で、表 2.2-3 のとおり区分している。

表 2.2-3 都市公園の種類

種類	種別	内容	
基幹公園	住区基幹公園	街区公園	もっぱら街区に居住するものの利用に供することを目的とする公園。面積0.25haを標準
		近隣公園	主として近隣に居住するものの利用に供することを目的とする公園。面積2haを標準。
		地区公園	主として徒歩圏内に居住するものの利用に供することを目的とする公園。面積4haを標準
	都市基幹公園	総合公園	都市住民全般の休息、鑑賞、散歩、遊戯、運動など総合的な利用に供することを目的とした公園。面積は都市規模に応じ10～50ha。
		運動公園	都市住民全般の運動の用に供することを目的とする公園。面積15～75haを標準。
特殊公園		風致公園、動植物公園、歴史公園、墓園など特殊な公園	
大規模公園	広域公園	主として1市町村の区域を越える広域のレクリエーション需要を充足することを目的とした公園。面積は50ha以上。	
	レクリエーション公園	大都市その他の都市圏域から発生する多様かつ選択性に富んだ広域レクリエーション需要を充足することを目的とした公園	
国営公園		主として1都府県の区域を越えるような広域的な利用に供することを目的として国が設置する。面積は300ha以上。	
緩衝緑地		大気汚染、騒音、振動、悪臭などの公害防止、緩和もしくはコンビナート地帯などの災害の防止を図ることを目的とした公園	
都市緑地		主として都市の自然的環境の保全、改善、都市景観の向上を図るために設置される緑地面積0.1ha以上	
都市林		主として動植物の生息地または生息地である樹林地等の保護を目的とする公園	
緑道		災害時における避難路の確保、市街地における姿勢駆るの安全性及び快適性の確保等を図ることを目的として、住区または住区相互を連絡するように設置される植樹帯及び歩行者路	
広場公園		主として商業・事務系の土地利用が行われる地域において、景観の向上、周辺施設利用者のための休息などの利用に供することを目的とした公園	

2.2.3 都市緑地の環境経済評価における関連研究のレビュー

都市緑地の環境経済評価は、公共事業実施において貴重な動植物資源の保護や観光資源の価値を計測する目的で実施されてきた経緯がある。環境質全体の環境経済性評価については、評価対象の希少性の観点から見た評価で、トラベルコスト法やヘドニックアプローチ、仮想評価法（CVM）などを用いた総合計測法が近年急速に発展している。しかし、都市緑地を直接的に対象とした環境経済性評価の事例はほとんどないのが現状である。

そこで、本項では緑地を構成しているパーツごとによる環境経済評価と都市緑地の持つ機能に着目した環境経済評価事例について整理した。

2.2.3.1 緑地を構成しているパーツ（水辺空間、緑地）の環境経済評価事例

（1）水辺空間における環境経済評価事例

都市緑地を構成する水辺空間に関する環境経済評価の検討事例を見ると、河口部周辺の干潟を対象として干潟の希少性の観点から経済性を検討した事例や、地域住民の身近な水辺環境の経済性を評価した事例がある。川村・安田ら（2001）は、東京湾横断道路の左右に

広がる盤洲干潟の地元である千葉県木更津市の地域住民を対象に CVM 調査を実施して干潟の環境価値を測定している。その中で、次のようなアンケート「盤洲干潟は、東京湾の海水浄化に大きな役割を果たしているとともに、野生動物が多数生息し渡り鳥の中継基地として知られています。これら豊かな生態系を保全するため、新たに“盤洲干潟保全基金”を創設すると仮定した場合、あなたは年間いくらまで支払いますか？」を実施し WTP を推計している⁶⁹⁾。このほか、干潟の環境経済評価に関しては、鷲田ほか(1998)により 1998 年 10 月に実施されたゴミ処理施設建設に伴う名古屋港の藤前干潟の調査がある⁷⁰⁾。

都市の水辺環境の環境経済評価は、萩原ら(1998)は川崎市二ヶ領本川を対象に、ふるさとの川モデル事業による河川再生による環境価値について地域住民の水辺利用状況から水辺環境を評価するモデルを構築しトラベルコスト法を応用して推計している。この場合、地域住民 900 人を対象にアンケート調査を実施し、河川の水辺に対する住民の水辺の利用行動及び属性（水辺までの時間、水質の良さ、樹木の良さ、水量の多さ、親しみやすさ、家族構成、ペットの有無など）をプラスのイメージからマイナスのイメージまで 5 段階に評価してもらい水辺の効用関数を導出し、水辺の特性が変化した場合の補償変分を算出することで経済性を推定している⁷¹⁾。水辺に関する既往研究としては、亀山(1995)によるため池の持つ公益的機能を住民税で評価した事例もある⁷²⁾。

(2) 樹木（森林）の環境経済評価事例

都市緑地を構成する樹木の環境経済評価は、森林が持つ各種公益的機能を評価することにより実施されてきた。小池ら（1986）は、森林が持つ公益的機能のうち、水源涵養機能、土砂崩壊防備機能、土砂流出防止機能、保健休養機能の 4 種の観点から国連の国民経済計算体系、費用便益分析、近年の資源環境勘定の 3 つの方向から論じている⁷³⁾。森林の水源涵養機能を評価した事例として、吉田(1997)は東京都民が多摩川水系・利根川水系の水源林の持つ価値を水道料金の価格変化に関する CVM アンケートにより推定している⁷⁴⁾。また、日本学術会議（2001）は、森林の公益的機能の経済評価手法について表 2.2-4 のとおり整理し、機能別に日本全体における価値の算定を行っている。

表 2.2-4 林地の多面的機能の環境経済評価⁷⁵⁾

機能	評価法	評価内容
二酸化炭素吸収	代替法	森林による二酸化炭素吸収量を火力発電所における二酸化炭素回収コストにより評価
表面侵食防止	代替法	森林により抑止されている侵食土砂量を、えん堤の建設費により評価
表層崩壊防止	代替法	森林による崩壊軽減面積から、山腹工の費用により評価
洪水緩和	代替法	森林が洪水流量を軽減する効果について、100年確率雨量の流量調節量を治水ダムの減価償却費及び年間維持費で評価
水資源貯留	代替法	森林土壌による流域貯留量について、利水ダムの減価償却費及び年間維持費で評価
水質浄化	代替法	森林による水質浄化機能を、雨水利用施設の減価償却費及び年間維持費で評価
生物多様性保全	代替法	森林性鳥類の餌代で評価
化石燃料代替	代替法	木造住宅の建築による化石燃料代替効果を火力発電所における二酸化炭素回収コストにより評価
酸素供給	代替法	森林による酸素供給量をタンクローリーによる液体酸素取引価格により評価
保健・リクリエーション	トラベルコスト法	森林の保養効果を森林風景鑑賞旅行費用で評価

2.2.3.2 都市緑地の持つ機能に着目した環境経済評価事例

表 2.2-2 に示した緑地の効果ごとに、環境経済評価の適用事例を以下に紹介する。なお、気温調節効果に関しては、2.1 節で述べている。

緑地の防音効果に関する研究事例はほとんどないが、交通分野において騒音の環境経済評価が実施されている。道路交通騒音の環境経済評価に関しては、一般的にヘドニック価格法が適用されている。Pearce et al(1989)とアメリカにおいて道路騒音と住宅の資産価値との関係を調査し、道路騒音 1dB 大きくなると住宅の資産価値が約 0.5%低下するとの結果を報告している⁷⁸⁾。国内においては、山崎(1991)が東京の環状 7 号線沿道の第 1 種住宅専用地域を対象として、道路騒音 1dB 低下の地価に及ぼす影響を 0.77%と推定している⁷⁷⁾。

緑地の持つ大気汚染防止効果に関しても、交通分野においてさまざまな検討が実施されている。交通分野における大気汚染計測事例は、大別してヘドニック価格法を用いて総合的に被害額を計測する方法、個別の被害を計測して合計する個別計測法の 2 つのアプローチが提案されている。ヘドニック価格法からのアプローチでは、Pearce et al(1989)は、資産価値に対する大気汚染の影響の影響を測定し、硫黄酸化物濃度(SOx)の 1%増加は資産価値の 0.06%-0.12%の低下、浮遊粒子状物質濃度(SPM)の 1%増加は資産価値の 0.05%-0.14%低下をもたらすことを示している⁷⁶⁾。また、個別法によるアプローチでは、「ドイツ連邦交通投資計画 1992」に関する評価指針(RAS-W)では、CH、SO₂、NO₂及び SPM それぞれの排出量を CO₂等価に換算し、この値に二酸化炭素 1t あたりの被害額を乗じて大気汚染の社会的被害額を計算する方法を採用している。

2.2.4 環境評価の政策利用の現状

2.2.4.1 米国における環境手法の政策利用

我国における環境経済評価の政策利用は、事業評価の際の便益算出に用いられているのみであり、損害賠償請求の基礎付けとして環境評価手法を採用している例は米国以外に見当たらない。

米国の行政機関における利用実態を見てみると、環境保護庁（EPA）では、種に費用便益分析の材料として環境評価手法を用いている。この流れは、特に1981年以降の大統領令から始まっており、1981年から1986年までにEPAで実施されてきた15件の費用便益分析のうち、6件が便益の貨幣評価を行ってきている。EPAの費用便益分析の内容は、大気汚染や水質浄化に適用していた。

商務省国家海洋大気管理局（NOAA）では、海域における自然資源損害評価に関する訴訟と、油濁法のもとでの損害評価ルールを担当している。その中で、タンカー座礁による原油流出事故が発生した際の損害評価にCVMが用いられ、賠償額の算定に適用された実績がある。また、産業廃棄物処分場におけるDDTとPCBなどの有毒物質排出訴訟における損害賠償額算定にCVMを用いた実績もある。

2.2.4.2 環境税（炭素税）の導入

気候変動枠組条約第3回締結国会議（COP3）において京都議定書が採択され、これを受けて2004年にはロシアも批准することを決定したことにより、温暖化効果ガス（GHG）の排出削減はいよいよ切実なものとなってきた。そこで、現在、先進各国はGHG排出削減に対して炭素税に代表される環境税を導入し、積極的に排出削減に取り組んでいる。表2.2-5に、世界各国の炭素税の導入事例を示す。ヨーロッパ各国における炭素税導入事例を見ると、エネルギー種別に細分化してそれぞれに税率を設定しており、国によってその税率が異なっている。

表 2.2-5 世界各国における炭素税導入実績 (2001年) ⁷⁸⁾

国名	税制	導入時期	主な課税物件及び税率	税収と用途	備考
フィンランド	炭素税	1990年1月	ガソリン 4,319円/kL ディーゼル 4,861円/kL 軽油 4,879円/kL 重油 5,800円/kL 天然ガス 1.9円/kL 石炭 4,445円/t 電力消費税 0.74円/kWh (1999年)	約470億円 (1997年) 一般財源	世界で始めて炭素税を導入 電力消費税については産業に対して 50%の軽減税率が適用 風力、地熱発電に対する税の軽減措 置
オランダ	一般燃料 税	1990年2月	ガソリン 1,271円/kL ディーゼル 1,402円/kL 重油 1,637円/kL 天然ガス 1.1円/kL 石炭 1,184円/t	約699億円 (1999年見込み) 一般財源	1988年4月に導入された環境調整金 が税に変更された 大規模な天然ガス消費に、減税措置 適用
	エネ ルギ ー規 制 税	1996年1月	天然ガス 10円/m ³ (800m ³ -5000m ³) 電気 2.41円/kWh (800kWh- 10,000kWh) 灯油 8,499円/kL (2000年1月)	約1,560億円 (1999年見込み) 一般財源	小規模エネルギー消費者を対象とし ているため、課税対象となる使用量 には上限と加減が設定されている 温室園芸産業及び再生可能エネル ギーによる発電に対する免税措置
ノルウェー	炭素税	1991年1月	ガソリン 11,988円/kL ディーゼル 5,994円/kL 重油 5,994円/kL 軽油 5,994円/kL 天然ガス 11.2円/m ³	約418億円 (1995年) 一般財源	産業用あるいは漁業用燃料に対する 軽減措置
デンマーク	炭素税	1992年5月	ディーゼル 3,926円/kL 軽油 3,926円/kL 重油 4,653円/kL 天然ガス 3.2円/kL 石炭 3,518円/t 電力 1.5円/kWh (2000年)	約567億円 (1997年) 一般財源	産業部門のプロセス別 (重工業と軽 工業) 及び政府との協定に応じた減 税あり
イタリア	炭素税	1999年1月 改正	ガソリン (無鉛) 63,839円/kL 灯油 42,083円/kL 石炭 2,320円/kg 天然ガス 0.5円/m ³ (2005年1月予)	約1,210億円 (1999年、増収 分) 一般財源	既存の鉱物油に関する物品税を二酸化炭素排 出量を考慮した課税方式に改正 2005年1月にかけて段階的に税率を変更
ドイツ	炭素税	1999年4月 改正	ガソリン 6,592円/kL 暖房用油 (家庭用) 2,198円/kL 暖房用油 (業務用) 440円/kL 天然ガス (家庭用) 176円/kL 電力 (家庭用) 1.4円/kWh 電力 (産業用) 0.5円/kWh	約6,208億円 (1999年、増収 分) 一般財源	税制改革は1999年から2002年の3段 階で実施予定 大口電力使用及びエネルギー集約型 産業等に対する軽減措置が適用

2.2.4.3 環境取引 (京都メカニズム)

京都議定書において、排出権削減のための方策は大別して以下の4項目を提示している。

① 共同実施 (Joint Implementation:JI)

共同実施は、先進国の2カ国が共同でGHG削減、または、吸収量回復につながるプロジェクト (森林植栽など) を実施し、削減効果を分け合う制度である。

② クリーン開発メカニズム (Clean Development Mechanism:CDM)

クリーン開発メカニズムは、投資国がホスト国において持続可能な開発を促す事業を行い、ホスト国に技術・資金を移転させ、投資国はその分の削減クレジットを得る手法である。

③ 排出権取引 (Emission Trading:ET)

排出権取引とは、汚染物質の排出許容量を総枠として設定し、個々の汚染主体ごとに一定の排出する権利を割り当て、市場においてその取引を認めるものである。価格の調整メカニズムを通して、総量規制を行うことを目的に導入するものであり、事業者にとっては排出枠を買う、排出枠を売る、排出量を削減するという行動を個々の事情により照らして選択することができる。

④ 吸収源活動

先進国での植林等のネットの GHG 吸収量増大プロジェクトの実施

2.2.4.4 環境政策の効果的实施方法

京都議定書が発行することにより、排出権取引を主体とする京都メカニズムが世界各国で運用され始めた。一般的に、環境問題への対策方法としては、大別して規制的手法、自主的取り組み、経済的手法の3つの方法が挙げられる。そして、これらの特徴を理解した上で、環境問題に応じて有効な方法を選択していくことが必要である。

規制的手法は、例えば環境汚染問題等で政府により汚染ガス等の排出基準値などを設定し、その基準値を超える排出を行った場合罰則を与えるなど、政府などが国家権力を行使するなどして環境目標を達成しようとする手法である。この手法は大規模発生源や大量生産商品などの限定的な取り締まりには有効であるが、行政コストがかかるなどの欠点がある。

自主的取り組みは、実情を知る事業者間などの当事者同士が目標を設定し環境目標の遵守を図る手法である。この手法の利点として、実現可能性が高い、費用対効果が高いなどがあげられるが、環境目標の設定値の問題やフリーライダーが存在することによる対策を講じた事業者が経済的に不利になる欠点が考えられる。

経済的手法は、市場メカニズムを通じて、各主体が合理的に取り組みを選択することにより、社会全体として最も効率的に排出削減を行うことを目的として実施するものである。経済的手法としては、OECD の分類によれば環境税、課徴金、補助金、デポジット制、排出権取引の4項目が示されているが、その中で排出権取引は総量を固定した上で価格で調節を行うことを目指したメカニズムであり、温暖化効果ガスの総量が問われる温暖化問題で中心となる政策の一つとなる。

今後の環境政策は、規制的手法、自主的手法を含め、さまざまな政策の組み合わせ（ポリシーミックス）によって実施され、その一環として都市緑化と環境税の関係や評価が議論されていく必要がある。

2.3 ヒートアイランドおよび地球温暖化対策の現状

2.3.1 ヒートアイランド対策の現状

先述のとおり、ヒートアイランドの発生要因としては、

- 1) 都市における人工排熱量の増大
 - 2) 地表面土地被覆の人工化（緑地・水面の減少と人工物、舗装面の増加）
- が主要な項目である。

ヒートアイランド対策を検討していく場合、ヒートアイランドの発生要因を分析し、その抑制法を抽出していくことが必要となってくる。以下に、ヒートアイランド現象の対策法を紹介する。

2.3.1.1 人工排熱量削減対策

人類は、快適な生活を営む上で様々な化石エネルギーを消費し、快適性を創出している。その際、第一次投入エネルギーのうち約49%が人工排熱として、大気中に放出されている。この場合の対策法のコンセプトとしては、以下の項目が考えられる(図2.3-1)。

- ・ エネルギー消費の低減
 - 省エネルギー意識の向上、空調等の適切な運用
- ・ 自然エネルギーの利用
 - 太陽熱、太陽光エネルギー、風力等自然エネルギーの利用
- ・ 低エネルギー型構造建築・地域システム
 - 建物の緑化（屋上緑化・壁面緑化）や壁面断熱、保水性建材、新建材（白濁ガラス等）等の利用による低エネルギー建築、地域冷暖房システムの導入



太陽光発電



日が当たると白濁するガラス

図 2.3-1 人工排熱抑制策の一例

2.3.1.2 地表面被覆の改善（緑地の減少）施策

土地利用別の地表面温度分布を比較すると、コンクリート・アスファルト系土地被覆は、森林・芝地等の食成系土地被覆と比較して、夏季の昼間において10℃以上高温であ



図 2.3-2 都市緑化事例

る。大都市圏においては、中心部でコンクリート・アスファルトにより被覆されており、そこで商業活動を効率的に実施しようとする、室内において空調等の利用が不可欠であり、人工排熱量が拡大する悪循環が生じている。そこで、これらのことを勘案すると、対策法のコンセプトとしては、以下の項目が考えられる。

- ・ 地表面の緑化
屋上緑化・壁面緑化、街路緑化や保水性舗装・透水性舗装の導入による地表面温度上昇の抑制(図 2.3-2)
- ・ 水辺の確保
河川のオープン化、ビオトープの創造

また、上記に示した人工排熱対策、地表面被覆対策は、個別に実施するよりも地域全体及び流域全体を1つの単位として実施した方が効率的で効果も大きくなる。

海外では、地域全体を一つのエコ共同体としてとらえ、都市計画を実施する際に熱圏、水圏、生物圏を有効に組み合わせた都市づくりを実施している。具体的な施策は以下の項目が考えられる。

- ・ 都市計画上の工夫
- ・ 風の道、水の道の創出(図 2.3-3)
- ・ 循環型都市の創造
- ・ エネルギー、物質のリサイクル等を地域全体で検討した循環型都市の構築



図 2.3-3 シュツットガルト（ドイツ）をぬける風の道

2.3.2 世界各国における地球温暖化対策の現状

2.3.2.1 国際的な地球環境問題への取り組みと国際条約

(1) 気候変動枠組条約（UNFCCC）

1990年のIPCCの第一次評価報告において、大気中の温室効果ガス（二酸化炭素、メタン等）の増大が地球を温暖化し自然の生態系等に悪影響を及ぼすおそれがあることが示された。そこで、大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させることを目的として、1992年6月にブラジルのリオデジャネイロで開催された地球サミット（UNCED、環境と開発に関する国連会議）において国連気候変動枠組条約（UNFCCC）が155ヶ国が条約に署名することにより発効した。UNFCCCは、1)締約国の共通だが差異のある責任、2)開発途上締約国等のニーズ・特別の状況への配慮、3)予防的対策の実施、4)持続可能な開発を促進する権利・責務、5)協力的な国際経済体制の確立への努力等の原則のもと、主に先進締約国に対し温室効果ガス削減のための政策の実施等の義務が課せられている。このUNFCCCのすべての国に公約を設定する形で自主的な取り組みを重視する一方でパフォーマンスを報告させる形で実効性を持たせようとする考え方は、後の京都議定書にも反映されている。

(2) COP1(第1回締結国会議)

UNFCCCは1994年3月に条約が発効したが、公約未達成に対する罰則規定などの法的拘束力が規定されておらず、また現実的に達成可能な削減目標を規定していなかったなどの問題が表面化した。そこで、1995年3月にドイツのベルリンで第1回締約国会議（COP1）が開催された。主たる議題は、1)温室効果ガス削減の数値目標と目標年度や2000年以降の行動について、2)共同実施の手順、3)手続き規則、4)途上国への資金援助のメカニズムである。これにより、2000年以降の温室効果ガス排出削減の数値目標を盛り込んだ議定書もしくは法的文書を第3回締結国会議で採択することを目指す「ベルリン・マンデード」が決議され、京都議定書へと進展していく。

(3) COP3 (京都議定書)

1997年3月に京都で開催された気候変動枠組条約第3回締約国会議では、先進国各国の温室効果ガス排出の削減目的を定めた京都議定書が採択された。また同時に、排出権取引 (Emission Trading, ET)・共同実施 (Joint Implementation, JI)・クリーン開発メカニズム (Clean Development Mechanism, CDM) の3つの温室効果ガス排出削減のための柔軟的措置 (京都メカニズム) が認められた。

(4) ボン合意、マラケシュ・アコード (COP4~COP7)

京都議定書では、温室効果ガス排出削減のための京都メカニズムの適用が認められたが、京都メカニズム実施に際しての具体的内容が未解決であるのみならず、温室効果ガス吸収源である森林の取り扱いや削減目標の未達成による罰則規定問題など京都議定書の履行に際しての課題が山積していた。そこで、1998年のCOP4以降、個別に課題を解決するための会議が断続的に開催された。図2.3-4に、地球温暖化関連の国際会議の流れと決定事項を示す。

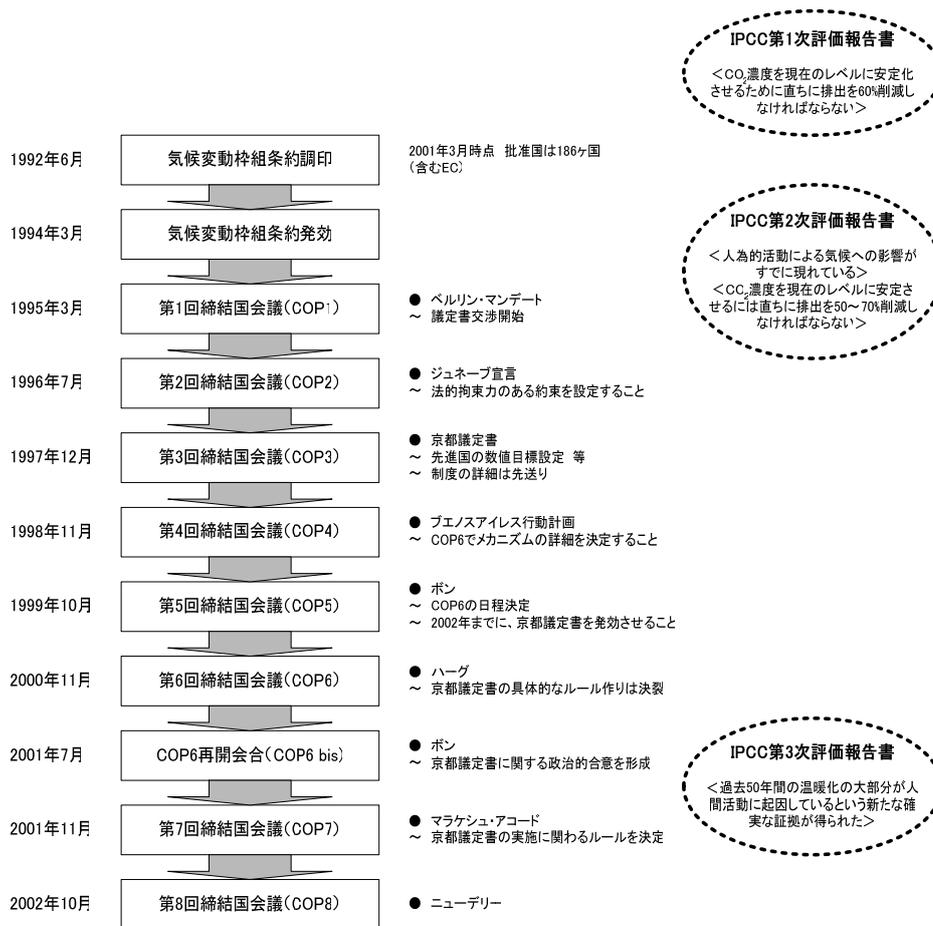


図 2.3-4 地球温暖化に関する国際会議の流れ⁷⁹⁾

2.3.2.2 「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC)による評価報告

IPCCとは、気候変動問題に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change)の略であり、1988年に設立され世界各国から3000人ほどの専門家が参加、5年ごとに評価報告書をまとめ、科学的知見を提供している。IPCCは、3つの作業部会により構成され温暖化の現状及び将来予測や社会的な影響、対策の方法などを世界的に検討している。

第1作業部会(WG1:気候変動の過去と将来)は、地球温暖化の現状や今後の予測を担当している。それによると、地球温暖化は、1861年から現在までに $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 上昇しており、過去50年間の温暖化は大部分が人間活動に起因することを示している。このまま温暖化が進行すると、 CO_2 濃度は現在(1999年)の370ppmから21世紀末までには540-970ppmへと上昇し、そのときの気温は $1.4-5.8^{\circ}\text{C}$ 上昇すると予測している。

また、第2作業部会(WG2:影響・適応)は、主に地球温暖化が進行することによる地球規模での様々な影響(農業、水循環、生態系、人間社会など)を検討する部会である。第2作業部会によると、地球温暖化による人間社会への影響としては、降水パターンの変化により水不足など水の影響を受ける人口は現在(1999年)の17億人から2025年には50億人へと拡大し、水不足が既存の農業可能地域に拡大することにより、農業・食糧安全保障への不安にもつながると警告している。また、温帯地域への亜熱帯生物の侵入に代表される生態系への影響や、海水面の上昇による沿岸域の浸食、高潮により浸水を受ける人口の増加(7500万人~2億人)、熱波による都市住民への影響、伝染病の拡大などが懸念されている。

第3作業部会(WG3:温暖化対策)は、有効な地球温暖化対策を検討している部会である。第3作業部会によると、地球温暖化対策は、風力発電やハイブリッド車の市場参入、燃料電池技術の進歩などによる技術の進展により世界のGHG排出レベルを2010-20年において2000年の水準以下にできる可能性があることを示しており、京都議定書で提示されたGHG削減目標に必要な先進国の費用は、2010時点でGDPの約0.2-2%(排出量取引なし)、0.1-1.1%(排出量取引あり)であると試算している。また、GHG排出削減に有効な政策手段としては、炭素税やエネルギー税、デポジット制度などの経済的手段が特に有効であると提言している。

1997年の気候変動枠組条約第3回締結国会議(COP3)で締結された京都議定書は、1990年のIPCC第1回評価報告書をベースに議論され、各国の排出目標や対策などの基礎資料となっている。

2.3.2.3 京都議定書 (COP3)

京都議定書は、1997年に京都で行われた気候変動枠組条約第3回締結国会議 (COP3) において採択された。

京都議定書における GHG 削減内容を表 2.3-1 に示す。京都議定書において決定された事項は大別して以下の2つ挙げることができる。

- ・先進各国の CO₂ 排出削減努力

先進各国は京都議定書の目標年である 2008 年から 2012 年にかけて、法的拘束力のある GHG 排出量の数値目標を負うことになった。数値目標は、各国の主張を考慮してその削減目標に差が設けられており、日本は 6%、米国は 7%、EU は 8% と定められた。

なお、吸収源の算入に際しては、1) 1990 年以降の新規の植林、再植林及び森林減少に限って、温室効果ガスの純吸収量を算入できる、2) 農業土壌、土地利用変化及び林業分野におけるその他の活動については、第2約束期間以降から適用することを基本とするが、各国の判断により第1約束期間からも適用可能。対象となる活動に具体的範囲等は更に検討した上で決定する、3) 1990 年に土地利用変化及び林業分野が純排出源となっていた国については、約束期間の割当量算定に当たって、基準年の排出量から、土地利用変化による吸収量を差し引くことが可能とされている。

- ・市場メカニズムを利用した柔軟的措置

先進各国は、京都議定書の数値目標を達成する上で、市場メカニズムに基づく各種の措置をとることで、その削減量に組み入れることができる。この柔軟的措置はブエノスアイレスでの COP4 から「京都メカニズム」と呼ばれており、排出権取引、共同実施、クリーン開発メカニズムから構成される。

京都議定書は、1) 55ヶ国以上の国が締結すること、2) 締結した附属書 I 国の合計の二酸化炭素の 1990 年の排出量が、全附属書 I 国の合計の排出量の 55% 以上により発効することとなっている。

表 2.3-1 京都議定書の概要⁷⁹⁾

項目	内容	参照条文
対象ガス	6種：二酸化炭素 (CO ₂)、メタン (NH ₄)、亜酸化窒素 (N ₂ O)、ハイドロフルオロカーボン (HFC)、パーフルオロカーボン (PFC)、六フッ化硫黄 (SF ₆)	3条
基準年	1990年 (HFC、PFC、SF ₆ については1995年を選択できる)	3条
目標期間	2008年～2012年の5年間 (第1約束期間)	3条
バイキング ボローイング	バイキング：次期以降の割当量に繰り越すことを認める ボローイング：次期目標期間からの借り入れは認めない	3条
吸収源	1990年以降の植林・森林再生・森林減少による吸収・排出分を数値目標に算入する。その他の吸収源については、京都議定書の第1回締結国会議以降に検討し決定する	3条3・4項
政策・措置	数値目標を達成するために附属書 I 国が講ずるエネルギー効率の向上、吸収源の保護・育成、技術の研究開発・利用の促進、市場的手法の適用等の政策・措置を実行すること	2条
柔軟的措置 (京都メカニズム)	国際間の排出権取引・共同実施 (JI)・クリーン開発メカニズム (CDM) など、他の国で削減する仕組みを認める	17条、6条、12条
共同達成	数値目標を複数の国が共同で達成することができる仕組み (EUバブル)	4条
不遵守	第1回締結国会議で、議定書の不遵守に対する適性かつ効果的な手続き及び仕組みについて決定。罰則を伴う遵守規定の場合、議定書の改定が必要	18条
発効の要件	以下の両方の条件を満たした日から90日後に発効 ① 条約締結国の内55カ国以上の国が批准 ② 批准した先進国 (附属書 I 国) の1990年の総CO ₂ 排出量が55%以上	25条

2.3.3 日本における地球温暖化対策とヒートアイランド対策

日本における屋上緑化施策は、欧米と比較してその地理的特性や歴史的背景からようやく端緒についたばかりである。江戸時代から昭和初期にかけて日本は、伝統的に木造住宅が主流であった。この木造住宅は、熱環境の観点から見ると環境負荷のかからない工法であり、自然共生型住宅である。しかし、高度経済成長とともに日本では、都心から郊外にかけて乱開発によりこれまで森林であった地域にコンクリート・アスファルトで被覆され、急速に緑地が減少していった。

近年、地球環境への関心とともに、欧米では過去の開発の歴史の反省から、各種環境や既存生態系に配慮した産業構造の転換や都市づくりを検討し始めている。また、都市開発の副産物である CO₂ などの GHG (温暖化効果ガス) の排出削減に取り組んでいる。

日本政府はこれらの外圧に押される形で、1990年代以降から、都市温暖化対策の重要な施策のひとつである緑化に本腰を入れ始めた。東京都は広さ 1000m² 以上の敷地について屋

上面積の20%について屋上緑化を義務付け、国土交通省においても2000m²以上の建物の屋上緑化を実施する場合には一定利率の補助金を出すなど、各地方自治体で施策を検討し実施に移している。表2.3-2に、主要な自治体の屋上緑化政策を示す。

表2.3-2 地方自治体における地球温暖化対策

自治体名	法的根拠	概要
東京都	東京における自然の保護と回復に関する条例	敷地面積1,000m ² 以上の民間施設及び敷地面積250m ² 以上の公共施設について20%をめどに緑化を義務付け
国土交通省	緑化施設整備計画	民間事業者が行う一定の屋上緑化施設を設ける延床面積+2,000m ² 以上の建築物（原則として住居用のものを除く）の整備に対して、日本政策投資銀行からの低利融資を行う。
東京都渋谷区	渋谷区みどりの確保に関する条例	300m ² 以上の敷地で、建築面積の20%以上の屋上緑化を義務化
東京都荒川区	荒川区市街地整備指導要綱	敷地1000m ² 未満は屋上有効部分の1割を緑化、敷地1000m ² 以上は屋上有効部分の2割を緑化を義務付け
愛知県岡崎市	岡崎市屋上等緑化事業奨励補助金交付制度	建物の屋上に常緑の樹木または地被植物を主体とした面積3m ² 以上の植栽をする場合、または建物の壁面に常緑のつる性植物を主体とした面積3m ² 以上の植栽をする場合、購入・設置費用の2/3（屋上は50,000円/m ² 、壁面は10,000円を限度とする）を、500,000円を限度として補助する。
神戸市	神戸市緑化基金事業	新たに屋上または壁面を緑化する場合、下記の金額を助成（促進区域以外の半壊以上の住宅を含む）。 ・戸建住宅の場合、6,700円/m ² で限度額100,000円。 ・小規模共同住宅の場合、6,700円/m ² で限度額100,000円。

2.4 本論文の位置づけ

既往研究のレビューを整理すると、以下のことが明らかとなった。

ヒートアイランドとクールアイランドに関する既往研究

- ① ヒートアイランド現象は、大都市のみならず地方の中小規模の都市でも発生している。また、ヒートアイランド強度は、都市の規模によってあまり変化が見られない。
- ② ヒートアイランド現象を定量化する手法は、対象とする水平スケールにより適用する手法が異なる。都市レベルのような広範囲な地域の熱収支を検討する場合は、衛星データや AMeDAS データ、土地利用データなどのデータが整備されており、解析単位もこれらのデータにあわせた事例が多い。これに対し、解析が詳細になるにつれて、データの種類が膨大になるだけではなく高い精度のデータが必要となる。
- ③ 近年、現地気象観測による熱環境の計測事例としては、模型実験による調査のほかに、赤外光を応用したシンチレーション法による計測事例も検討されてきている。
- ④ 蒸散量の計測方法は、樹木1本単位による調査手法としてはペンマン法、ヒートパルス法、蒸散速度を求める方法があり、広域の蒸発散を算出する方法としては、熱収支や水収支、衛星リモートセンシング技術がある。
- ⑤ 人工排熱のヒートアイランドへの影響としては、冷房消費エネルギーの増加傾向の中で、減少あるいは極端に高い増加がある年は、平均気温が低い又は高い年と対応しており、冷房消費エネルギーが気温と密接に関係していることを示している。
- ⑥ 緑地とヒートアイランドに関連する研究事例では、林地全体ばかりでなく街路樹1本でも熱環境効果がある。
- ⑦ 都市の緑と二酸化炭素固定との関わりを検討した研究事例は殆ど見られない。
- ⑧ 水面の熱環境緩和効果を潜熱フラックスの観点から比較してみると、植生>植生が繁茂した水面>植生のない水面の順となっている。
- ⑨ 林齢と NDVI との間には、胸高直径の生長則である Mitscherlich の法則が成立する。
- ⑩ 都市計画 GIS と熱環境評価手法とを組み合わせ、都市の人工排熱、ヒートアイランド、クールアイランドを総合的に検討評価した事例研究は過去の主要論文（ジャーナル）には見出せていない。
- ⑪ 多様な植生を有する水面の熱収支（蒸発散量）に対してシンチレーション法を適用して観測・評価した具体的な事例研究はない。

都市緑地の環境経済評価に関する既往研究

- ① 水辺空間の環境経済評価事例は、生態系保全からのアプローチや存在価値からのアプローチの2通りあり、CVM やトラベルコスト法を用いて推定している。
- ② 樹木の環境経済評価は、森林が持つ各種公益的機能のうち騒音抑制や大気汚染防止機能に関してヘドニックアプローチによる推定法は実施されているが、その他の機能に

関しては代替法が適用されている。

- ③ クールアイランド効果の直接的な主要素である樹木、草、水面からの蒸発量を熱環境エネルギーと経済的な貨幣価値に換算して評価した事例研究は過去の主要論文（ジャーナル）にはない。

既往文献を整理すると、都市緑地の都市熱環境緩和効果のメカニズムやその定量化手法、森林や草地、水面のクールアイランド効果を個別に定量化した事例は数多く見られる。また、都市熱環境を構成する要因である人工排熱、対流顕熱、蒸発潜熱を個別に定量化した事例も多い。その反面、緑地や池の水深、池面の被覆状態などクールアイランド項目全般を定量化した事例はなく、また、都市の人工排熱、ヒートアイランド、クールアイランドを総合的に検討評価した事例は少ない。また、クールアイランド効果の直接的な主要素である樹木、草、水面からの蒸発量を熱環境エネルギーと経済的な貨幣価値に換算して評価した事例研究は過去の主要論文（ジャーナル）には見出せていないのが現状である。

本論では、都市計画 GIS、リモートセンシング、現地気象観測のツールを用いて、ヒートアイランド問題における都市緑地の重要性を人工排熱と対流顕熱を比較することにより明確にし、“樹木”、“芝”、“浅い水面”、“水面”、“水草で被覆された水面”のクールアイランド効果を定量化することで、都市緑地全般のクールアイランド効果の評価を行った。また、樹木は年々生長しクールアイランド効果も向上するものと考えられる。そこで、リモートセンシングで計測できる植生指標を用いて樹木の生長に伴うクールアイランドの増加効果をモデル化し、都市緑地のクールアイランド効果の推移について試行的に実施した。さらに、樹木、草、水面のクールアイランド効果を蒸発散の観点から経済的な貨幣価値に換算して評価することで、都市緑地のクールアイランド効果の定量化から予測、効果の評価まで一連の流れをモデル化し、モデル検討により熱環境の視点から都市緑地の整備方針を検討していく。以上の結果をもとに、ヒートアイランドを抑制するための都市緑地の整備方針について検討するとともに、その効果を持続させるための管理モデルについて検討する。

過去において、都市緑地のクールアイランド効果の定量化から予測、評価、管理までの一連の流れを体系化した検討事例はない。この流れを提示することが本論のオリジナルである。

第3章 都市熱環境問題における都市緑地の重要性の検証

都市の温暖化問題への関心が高まる中で、ヒートアイランドやクールアイランドなどの都市気候に関わる熱環境問題が新しい都市問題へのテーマとして浮上してきている。都市温暖化は地球温暖化と似た現象ではあるが、熱環境の変化のメカニズムと人間社会に与える影響は必ずしも同じではない。都市温暖化/ヒートアイランドは、人工排熱排出に代表されるエネルギー問題のみならず、夏季にはコンクリート・アスファルトからなる土木・建築構造物の顕熱輸送（蓄熱・放熱）に大きな影響を受けている。他方、蒸発潜熱を持つ「緑と水」は天然のクーラーとして都市気候を調整するクールアイランド効果を有しており、地域レベルの大気環境を保全する役割を果たしている。現在、政府が掲げている「環境と共生した都市づくり」は、1)省エネ・省資源・リサイクル（エネルギー）、2)水循環型（水）、3)都市大気保全・気候緩和・自然共生型（緑）の3本柱の都市づくりの要素からなり、その中で「緑」と「水」は、自然の大気水循環システムを構成する重要な都市計画の環境構成要素でもある。本章では、はじめに、大都市レベルの熱環境の実態を横浜市を対象に解析した。次に、都市緑地を構成する「緑と水」が大都市の熱環境に及ぼす影響について検討し、大都市における都市緑地の役割を示した。具体的には、はじめに300万都市である横浜市を対象に土地利用情報から人工排熱を算出し、ヒートアイランドの原因の一つである人工排熱の分布特性と季節的な変動について整理した。次に、都市内の緑の増減が都市熱環境に及ぼす影響及び緑地や水面の有する潜熱輸送による気温調整効果が地域レベルの温暖化に影響しているかをGISと衛星リモートセンシング技術、シミュレーション技術を用いて解析した。

3.1 都市人工排熱解析

3.1.1 解析の考え方

横浜市の都市計画に係わる基本的な情報は、都市計画を実現するため法的拘束力（財産権の規制）を伴う地域地区・都市施設等の指定情報から、都市計画策定に必要な基礎調査で収集・分析される人口及び土地・建物利用現況のような支援情報に至るまで膨大なデータが横浜市都市計画情報システム（都市計画GIS）に整備されている。本情報は基本的に250mメッシュ単位であり、メッシュの中に土地利用面積や用途面積などが格納されている。また、環境（自然）に係わる基本情報は、環境保全局の横浜市環境情報システムに整備されている。この情報は、昭和49年の整備開始時点において日本でもっとも細密な5mメッシュにより構成されており、そのメッシュの中でもっとも面積の多い土地利用がそのメッシュの代表的な土地利用となっている。両者ともにデータベースを地理情報システム(GIS)に組み込んでいるが、水環境の一部の基本データが環境局に整備されている以外は、熱環境に係わる情報が整備されている状況にはなっていない。そこで、本調査では、これらの基本的数値地理情報を衛星リモートセンシング情報と組み合わせて都市の熱環境の解析に利

用することを検討した。

図 3.1-1 に研究手順のフロー図を示す。都市計画局 GIS は、平成 6 年 3 月時点で利用できる GIS は昭和 54 年度と昭和 59 年度の 2 種類である。このなかで都市計画的土地利用データベースと建物用途別現況調査のメッシュデータベースを人工排熱の原単位と組み合わせることで都市の人工排熱量の算定に利用した。

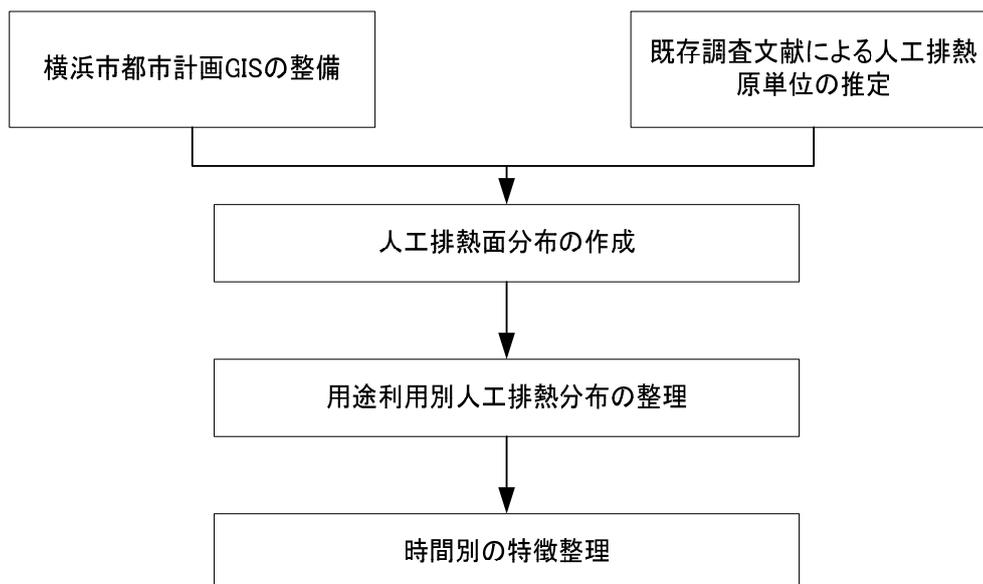


図 3.1-1 人工排熱算出手順

3.1.2 横浜市都市計画局（土地利用）地理情報システム(GIS)

都市の人工熱解析に用いられる基本的な都市計画情報は土地利用現況のメッシュデータである。メッシュデータは、各土地利用を中分類（13 種）と小分類（34 種）の類型ごとに面積及び面積率で示し、建築物は用途、構造、階層別の要素について建物面積と延床面積で示している。メッシュ図は昭和 54 年度と昭和 59 年度のデータにもとづき作成されているが、土地利用の全ての分類が整理されているものは昭和 59 年度である。よって本論では昭和 59 年度のメッシュデータを基準として作業を進める。横浜市の土地利用動向は以下のとおりである。

- 1) 昭和 58 年横浜市土地利用現況調査による土地利用は、市域面積約 429.9km²のうち都市的土地利用は約 306.2 km²、自然的土地利用は約 123.7 km² で、構成比は 71.2 % 対 28.8 %となる。
- 2) 昭和 58 年の都市的土地利用の内訳は、住宅地区約 111.6 km²、商業・業務地区約 11.9 km²、特殊商業地区約 1.5 km²、工場地区約 28.2 km²、市民サービス施設地区 17.8 km²、

都市運営施設地区約 74.8 km²、都市的オープンスペース約 19.8 km²及びその他約 40.6 km²である。

- 3) 昭和 58 年の自然的土地利用は農業地約 54.4 km²、森林地約 54.3 km²、河川・水面水路約 8.2 km²及び荒れ地約 7.1 km²である。
- 4) 土地利用増減は、昭和 53 年から昭和 58 年の 5 箇年で、埋め立て等により 349.8 ha 増加。都市的土地利用は、2,325.2 ha の増加、一方、自然的土地利用は 1,975.4 ha 減少している。

昭和 59 年の建物利用現況調査における市全体の建築面積総計は約 60.5 km² で、「住宅 1」（一戸建住宅）が約 28.5 km²（構成比 47%）で建築面積の大半を占めており、次いで「住宅 2」（共同住宅等）が約 8.0 km²（構成比 13.2%）、軽工業施設が約 4.6 km²（構成比 7.6%）という順になっている。建築面積は昭和 54～59 年までの 5 箇年間で約 7.9 km² 増床している。また、昭和 59 年の延床面積総計は約 112.4 km² で、「住宅 1」（一戸建住宅）が約 41.3 km²（構成比 36.7%）で最も大きい。次いで「住宅 2」（共同住宅等）が約 25.5 km²（構成比 22.9%）、軽工業施設約 7.1 km²（構成比 6.4%）という順になっている。昭和 59 年における本市全体の建物の平均階数（建物延床面積総計／建築面積総計）は 1.9 階である。道路面積は総計で 54.5 km² あり、そのなかで幹線道路が 6.5 km²（構成比 10.3%）、一般道路が 47.9 km²（構成比 89.7%）を占めている。

3.1.3 大都市における人工排熱特性

横浜市のエネルギーフローとエネルギー消費の特徴と、地球温暖化の最も直接的な原因の一つの考えられている都市型のエネルギー損失、すなわち人工排熱について検討する。

3.1.3.1 横浜市のエネルギーフロー

横浜市が平成 2 年に実施したエネルギー調査によると、横浜市における一次投入エネルギー量は 102.9 百万 Gcal・yr⁻¹、有効エネルギー消費量は 38.4%の 39.51 百万 Gcal・yr⁻¹、エネルギーロス（排熱）は 48.4%の 49.8 百万 Gcal・yr⁻¹である。市内に立地する発電所、LNG 基地等において生産された電力、ガスは優先的に市内への供給に割り当てられると考えるが、横浜市は電力、都市ガスともに、市内生産量が消費量を上回っているため、余剰分（電力：1.03 百万 Gcal・yr⁻¹、都市ガス：12.55 Gcal・yr⁻¹）は他都市へ供給されると仮定してエネルギーフローを検討している¹⁾。

なお、エネルギー転換部門は電力、都市ガスについてのみ考慮し、それぞれ東京電力、東京ガスより入手した 1991 年度の統計データを基に、市内におけるエネルギー源別一次エネルギー投入量及びエネルギー転換効率を算定している。横浜市統計書によれば、電力使用量の合計は 92.6 億 kWh で、ガスの消費量は 21.1 百万 m³である。石炭及び石油については市内における転換、精製等は考えず、「消費量＝投入エネルギー量」として取り扱う。第一

次エネルギー投入量をエネルギー源別で見ると石油が51.1%と大部分を占め、次いで天然ガスが39.6%、石炭が9.3%の順である。消費部門別では産業用が第一次エネルギー投入量に対して、28.6%、次いで民生用が19.1%、運輸が15.5%と続いている。最終エネルギーの消費効率については民生部門が最も高く84.7%、次いで産業部門が61.5%、運輸部門が26.5%の順である。民生部門のエネルギー消費効率がこのように高いのは、電力利用の効率機器（ヒートポンプ）の使用が多いことによる（図3.1-2）。

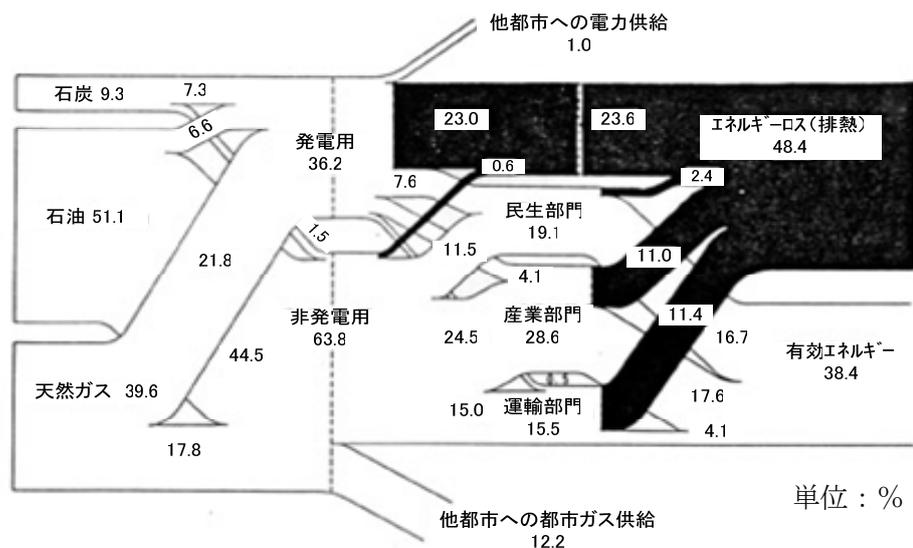


図 3.1-2 横浜市エネルギーフロー

横浜市で特徴的な電力用エネルギーは、天然ガス(22.34 百万 Gcal・yr⁻¹)、石油(6.791 百万 Gcal・yr⁻¹)、石炭(7.512 百万 Gcal・yr⁻¹)から供給されるが、発電時に大量のロスを伴い、このうちの63.5%の23.67 百万 Gcal・yr⁻¹がエネルギーロス(排熱)となっている。大都市圏には珍しく、海岸部に沿う「横浜」「南横浜」「磯子」の3地点に発電所が存在し、発電に伴う排熱(エネルギーロス)が大量に排出されるために、この3地点に人工排熱の極値が発生する形になる。

1989年から1991年の2年間で第一次エネルギー投入量は99.8 百万 Gcal・yr⁻¹から102.9 百万 Gcal・yr⁻¹に3.1%増大したが、逆にエネルギーロス(排熱)の比率は省エネを進めた結果49.7%から48.4%に減少している。

3.1.3.2 横浜市におけるエネルギー消費の特徴

横浜市の非発電用エネルギー消費(65.65 百万 Gcal・yr⁻¹)は全国消費量の約2%程度を占め、特徴としては、家庭用のエネルギー消費の対全国比率(2.9%)が大きい。横浜市におけるエネルギーの効率的利用を考える上で、産業用エネルギー消費の伸びと効率の両者

に注意を払っていくことも必要である。しかし、市の施策としてはエネルギー消費の伸び率が高いので、すなわち将来において施策の与える影響度が大きいと考えられる民生用、特に業務用エネルギーの効率的利用（例えば 地域冷暖房、コージェネレーション等）、ならびにやはり高い伸び率と熱効率に問題の多い運輸部門への対策を中心に検討することが課題となっている。横浜市内の発電用を除くエネルギー消費量 65.65 百万 $\text{Gcal}\cdot\text{yr}^{-1}$ を総人口の $3,250,887$ で割ると、市民一人当たり $20.2\text{Gcal}\cdot\text{yr}^{-1}\cdot\text{人}^{-1}$ のエネルギー消費になる。人工排熱量は $15.3\text{Gcal}\cdot\text{yr}^{-1}\cdot\text{人}^{-1}$ である。

3.1.4 都市計画 GIS データによる都市人工排熱量の評価

大都市圏に位置する主要都市では、産業、交通や様々な業務活動にともない大量のエネルギーが消費され、そのエネルギーが最終形態である熱となり、アスファルトやコンクリートなどの地表面被覆の変化と相まって都市の気温を上昇させている。都市域の地表面被覆状態の変化が熱収支特性を大きく変え、そして人工熱の排出量は熱環境的に無視できない大きさである。人工熱の影響については夜間と日射のある昼間とではその出現の仕方に違いがあり、とくに人工排熱は熱環境への影響が昼夜にわたっており、長期化する熱帯夜と冬期の都市温暖化現象の主要な原因の一つに考えられている。

人工排熱量の解析には、従来、消費エネルギー用途別原単位に数量である基礎指標を乗じて計算する方法（以下、原単位法という）がとられ、それによって人工熱排出量やその地域分布、等を求める。横浜市環境保全局は省エネルギー環境対策の一環として、主に交通や熱供給施設を対象に、エネルギーの実績供給量や販売量から人工熱排出量の総量を算定しているので、これによって原単位法による人工熱排出量を算定する。人工排熱量の解析においては、守田（1994）が設定した熱排出原単位を適用し、それに基礎指標を乗じて熱排出量を求める²⁾。

今回、GIS メッシュ・データ（昭和 59 年）をベースに計算した都市計画的土地利用区分にもとづく建築用途別の延床面積に換算した都市人工排熱の原単位 ($\text{Gcal}\cdot\text{yr}^{-1}$ 、 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) は、横浜市環境保全局（1991）のエネルギー統計データを基礎数値として用いた³⁾。第一次エネルギー投入量＝消費量 $98,908,265\text{Gcal}\cdot\text{yr}^{-1}$ に対する有効エネルギー $49,750,857\text{Gcal}\cdot\text{yr}^{-1}$ の差分 $49,157,408\text{Gcal}\cdot\text{yr}^{-1}$ が総人工排熱量である。発電所排熱は 3 ケ所の発電総量 $14,592,408\text{Gcal}\cdot\text{yr}^{-1}$ に熱効率 38-39% と交換効率 80% を乗じて $18,709,461\text{Gcal}\cdot\text{yr}^{-1}$ 、運輸（自動車）排熱は自動車の総エネルギー使用量 $14,118,183\text{Gcal}\cdot\text{yr}^{-1}$ に排熱比率 73.5% を乗じた $10,372,543\text{Gcal}\cdot\text{yr}^{-1}$ とし、この両者を総人工排熱量から差し引いた熱量 $20,075,404\text{Gcal}\cdot\text{yr}^{-1}$ を都市計画的土地利用＝建物用途別単位床面積から発生する人工排熱としている。最終的には、単位面積当たりの排熱原単位は GIS を使ってシミュレーションして総人工排熱量に一致するようパラメータの微調整を行い、整合性を持たせた。

3.1.4.1 人工排熱原単位の設定

住宅・業務用と商・工業用に代表される生活・生産施設系の排熱量の原単位は、大首都圏（東京）を代表する最新の研究成果として評価されている守田（1994年）の数値を参照した。横浜市都市計画 GIS メッシュデータの基本分類（中・小分類）のファイル構造にあわせて各施設形態の土地利用単位面積を建物床面積単位に換算して人工排熱原単位を推定し、次に GIS メッシュデータの基礎指標（延床面積）と排熱原単位を組み合わせる人工排熱量の地域的な分布および量的な評価を行なった。横浜市都市計画 GIS メッシュデータの基本分類（土地利用小分類）とその区分のファイル構造にあわせて、土地利用の単位面積あたりの原単位を設定した。表 3.1-1 に設定した土地利用別の人工排熱原単位を示す。

表 3.1-1 土地利用別人工排熱原単位一覧

中分類		住宅地区		商業・業務地区					特殊商業地区	
小分類		低層住宅地区	中層住宅地区	高度商業地区	一般商業地区	店舗併用住宅地区	商業業務併用中層住宅地区	業務地区	宿泊施設地区	娯楽・遊戯施設地区
人工排熱原単位	(Wm ⁻²)	10.1	10.1	70.2	57.2	33.7	44.8	32.4	75.6	43.2
	Gcal・m ⁻² ・yr ⁻¹	0.077	0.077	0.532	0.434	0.255	0.339	0.245	0.573	0.327

中分類		工業地区		商業・業務地区			特殊商業地区			
小分類		工業併用住宅地区	工業地区	公共業務地区	教育施設地区	文化・宗教・運動施設地区	幹線道路	一般道路	運輸・流通施設地区	供給・処理施設地区
人工排熱原単位	(Wm ⁻²)	39.5	68.9	38.3	19.4	19.4	28	28	21.8	135.1
	Gcal・m ⁻² ・yr ⁻¹	0.299	0.522	0.29	0.147	0.147	0.212	0.212	0.165	1.023

3.1.4.2 人工排熱算定結果

表 3.1-1 の単位面積当たりの排熱原単位と横浜市都市計画的土地利用 GIS メッシュデータ（1単位は 250m×250m のサイズで合計 7,394 メッシュ）の建物用途分類にもとづく都市的土地利用面積とを組み合わせる人工排熱を算出する。図 3.1-3 に人工排熱面分布を、表 3.1-2 都市的土地利用別の人工排熱量算定結果を、表 3.1-3 に土地利用区分別の人工排熱を示す。

住宅系の排熱量は合計で $6.46 \times 10^6 \text{Gcal} \cdot \text{yr}^{-1}$ となり全体の 30.4% を占め、その内訳は、低層住宅； $3.17 \times 10^6 \text{Gcal} \cdot \text{yr}^{-1}$ 、2) 中層住宅； $1.96 \times 10^6 \text{Gcal} \cdot \text{yr}^{-1}$ 、文化・宗教施設； $1.32 \times 10^6 \text{Gcal} \cdot \text{yr}^{-1}$ である。商業施設系の排熱量は合計で $5.92 \times 10^6 \text{Gcal} \cdot \text{yr}^{-1}$ となり全体の 27.9% を占め、工業施設系は $8.86 \times 10^6 \text{Gcal} \cdot \text{yr}^{-1}$ で全体の 41.7% を占めている。

住宅系は単位排熱量そのものが小さいが、市中心部の商工業密集地帯をのぞくほぼ全域に分布している、他方、商・工業系は中心部の生産拠点となっている海岸沿いの密集市街地区に排熱の分布が集中する傾向が明らかである。土地利用/建築用途別で最も排熱量が大きなものは工業地区の $6.53 \times 10^6 \text{Gcal} \cdot \text{yr}^{-1}$ である。住宅、商・工業、公共施設系に代表される人工排熱の総計 $21.2 \times 10^6 \text{Gcal}$ は市全体の 1989 年の人工排熱総量 $49.2 \times 10^6 \text{Gcal}$ の約 43% に達し、膨大な量の人工排熱エネルギーが臨海部に沿った市街化密集地域を中心に大気のなかに放出されている様子が読み取れる。

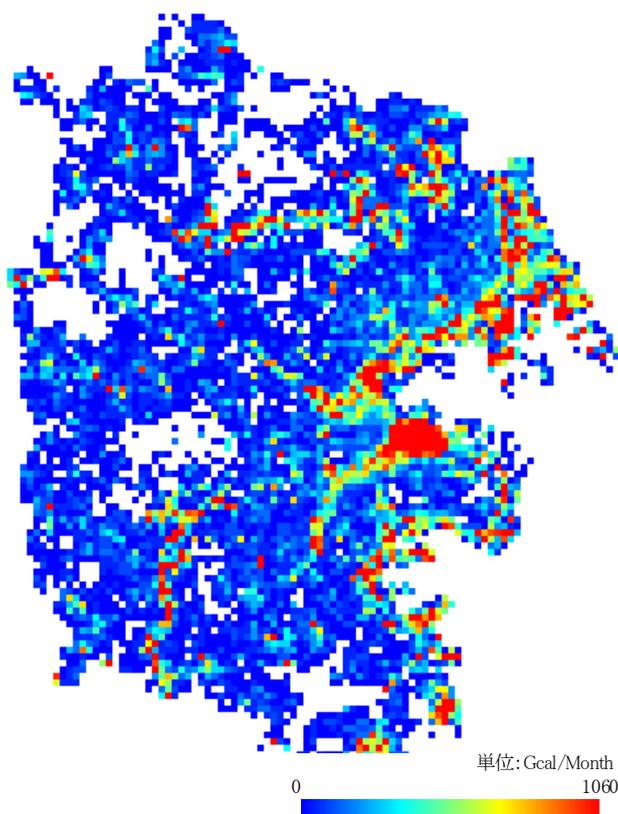


図 3.1-3 人工排熱面分布（横浜市、1992 年）

表 3.1-2 都市計画的土地利用区分別人工排熱量（昭和 59 年）

中分類	小分類	区分	土地利用面積	延床面積	人工排熱量
			(m ²)	(m ²)	(Gcal・yr ⁻¹)
住宅地区	低層住宅地区	住居系	99,040,576	41,263,188	3,172,809
	中層住宅地区		14,811,030	25,532,040	1,963,210
商業・業務地区	高度商業地区	商業系	720,881	4,365,986	2,322,502
	一般商業地区		2,528,574		
	店舗併用住宅地区		6,800,304		
	商業・業務併用中層住宅地区		1,652,577	4,517,574	1,533,581
	業務地区		7,690,101	4,428,691	1,086,801
特殊商業地区	宿泊施設地区		372,832	401,537	229,920
	娯楽・遊技施設地区		902,963	913,708	298,965
工業地区	工業併用住宅地区	工業系	1,043,797	1,642,470	491,736
	工業地区		23,040,797	12,512,930	6,530,298
市民サービス施設地区	公共業務地区	商業系	1,507,911	1,531,658	444,778
	教育施設地区	住居系	12,431,648		
	文化・宗教・運動施設地区		3,572,786	8,971,678	1,320,990
	医療・厚生施設地区		2,103,940		
都市運営施設地区	幹線道路		6,553,115		
	一般道路		47,923,025		
	運輸・流通施設地区	工業系	12,095,211	5,182,007	856,254
供給・処理施設地区	4,648,231		963,346	985,810	
その他	在日米軍基地		5,060,284		
合計			254,500,583	112,226,813	21,237,654

表 3.1-3 用途区分別人工排熱割合

区分	人工排熱量	割合
	(Gcal・yr ⁻¹)	(%)
住宅系	6,457,009	30.4
商業系	5,916,547	27.9
工業系	8,864,098	41.7
合計	21,237,654	100

3.1.4.3 人工排熱量の時間変動

都市の人工排熱量が冬期に多く、夏期にはそれほどでもないとの理解を定量的に検証するために、人工排熱の月変動を検討した。区ごとの人工排熱は、エネルギー消費に比例すると仮定して月別のエネルギー消費の変動係数を人工排熱総量に割りふって月単位の人工排熱を求めている。横浜市のエネルギー統計では月単位の統計資料として公表されていないので、守田（1994）が東京都で検討した最新の月単位エネルギー統計を参照した。エネルギー消費=人工排熱の排出量が大きくなるのは冬期（暖房）で、最大は1月の月変動係数が1.2、冷暖房の需要が少ない春は平均以下で0.8-0.9、盛夏の8月は年平均の1.0である。夏の甲子園の高校野球のころに電力需要が最大のピークになるのは時間単位の瞬時のことで月平均にすると8月は平均的な人工排熱放出量になっている（表3.1-4、図3.1-4）。

表 3.1-4 エネルギー消費の変動係数

月	係数
1	1.2022
2	1.1355
3	1.1104
4	0.9316
5	0.8884
6	0.8766
7	0.9402
8	0.9958
9	0.9834
10	0.9671
11	0.9024
12	1.0664

一般に人工排熱のヒートアイランド現象への寄与という点では昼間の影響は小さく、むしろ夜間の排出熱が問題で、熱帯夜の長期化等の主要な原因と考えられている。しかし、

熱排ガス等による道路系の人工排熱は通過交通量に比例して昼間に多く夜間に減少する傾向が明らかである。昼間は、道路舗装面やコンクリート建物などの地表面の空間的な熱特性に起因する顕熱輸送から発生する熱量が相対的に大きい。都市の熱環境解析において、日射量のみが時間単位で与えられる安定した物理パラメータであるが、市や区の空間スケールで交通量やエネルギーの統計資料が時間単位のデータとして与えられる条件は未だ整備されていない。

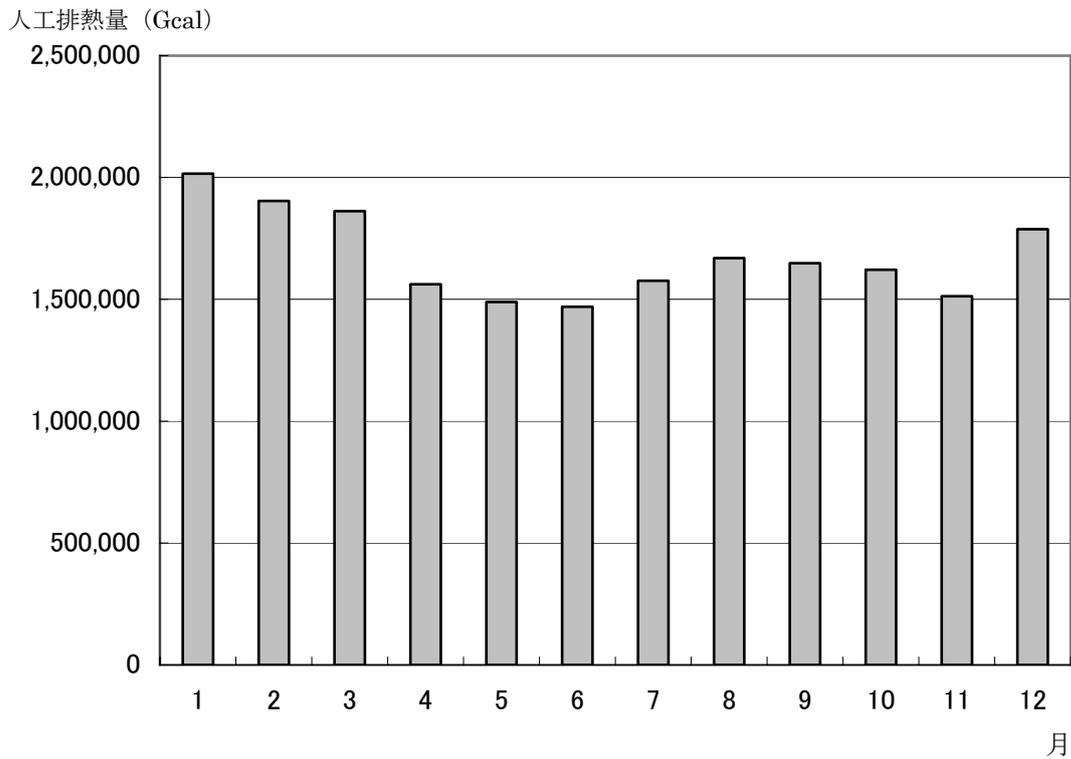


図 3.1-4 横浜市人工排熱量の月変化

3.2 都市全体から見た緑化の熱環境緩和効果の検証

ヒートアイランドの強度は都市化の規模に比例して大きくなり、都市の温暖化は突発的な豪雨や熱帯夜の増加等の異常気象の主要な要因となっている。そこで、地球環境時代にヒートアイランドとクールアイランドの構造とメカニズムを解明し適切な対策を検討することが、21世紀に向けて地球上の人類に課せられた重要な問題であると言っても過言ではない。本論では、クールアイランドの成因とヒートアイランド原因の一つと考えられる”都市緑地の減少”がどの程度都市の熱環境に影響を及ぼすかについて検討を行った。一般に、都市の熱環境の解析を行う場合、都市全域の緑地面積や温度分布を把握する必要があり、車両等による移動観測や測定点による同時観測手法が随時行われてきた。しかし、この手法では移動中に気象条件が変わる、測定点に限られる、等の問題があり、効率的に現地的情報を取得しにくい。そこで、衛星リモートセンシング技術を用い、衛星画像から算出される植物活力度(NDVI)と地表面放射輝度の関係を調査し、緑地の増減による熱環境の変化を推定した。なお、本検討は、衛星画像と土地利用図を用いて、土地利用の変化に伴う熱環境変化をNDVIと赤外放射輝度(地表面温度)で表現したものである。しかし、土地利用図1画素内の植生の状況などが不明であるため、算出精度に難があると考えられる。よって、本論における取り扱いは、試算レベルにとどめる。

3.2.1 解析手順

解析手順は、はじめに、1)LandsatTM データ(空間分解能 30m)及び土地利用図(空間分解能 5m)を UTM 座標系に変換する。2)LandsatTM データより算出される植生指標(NDVI)と地表面放射輝度(Band6)との関係を調査し、NDVI を指標とした関係式を検討する。次に、3)土地利用図と LandsatTM データとを比較し、LandsatTM の1ピクセルすべてが樹林地である画素、また、LandsatTM の1ピクセルすべてがコンクリート・アスファルトである画素のNDVIを算出する。4)土地利用を変化させた場合(コンクリート・アスファルトから樹林地、緑地からコンクリート・アスファルト)におけるNDVIを推定する。最後に、5)NDVIと赤外放射輝度との関係式より土地利用を変化させた場合の赤外放射輝度を推定する。図3.2-1に、検討手順を示す。

3.2.2 解析使用データ

土地利用の変化に伴う熱環境の予測に使用したデータは表3.2-1に示す。

表 3.2-1 解析使用データ

データ名		地上分解能	観測年月日
Landsat TM	パスローウ 107-35	30m	1984年8月16日
土地利用図		5m	1984年

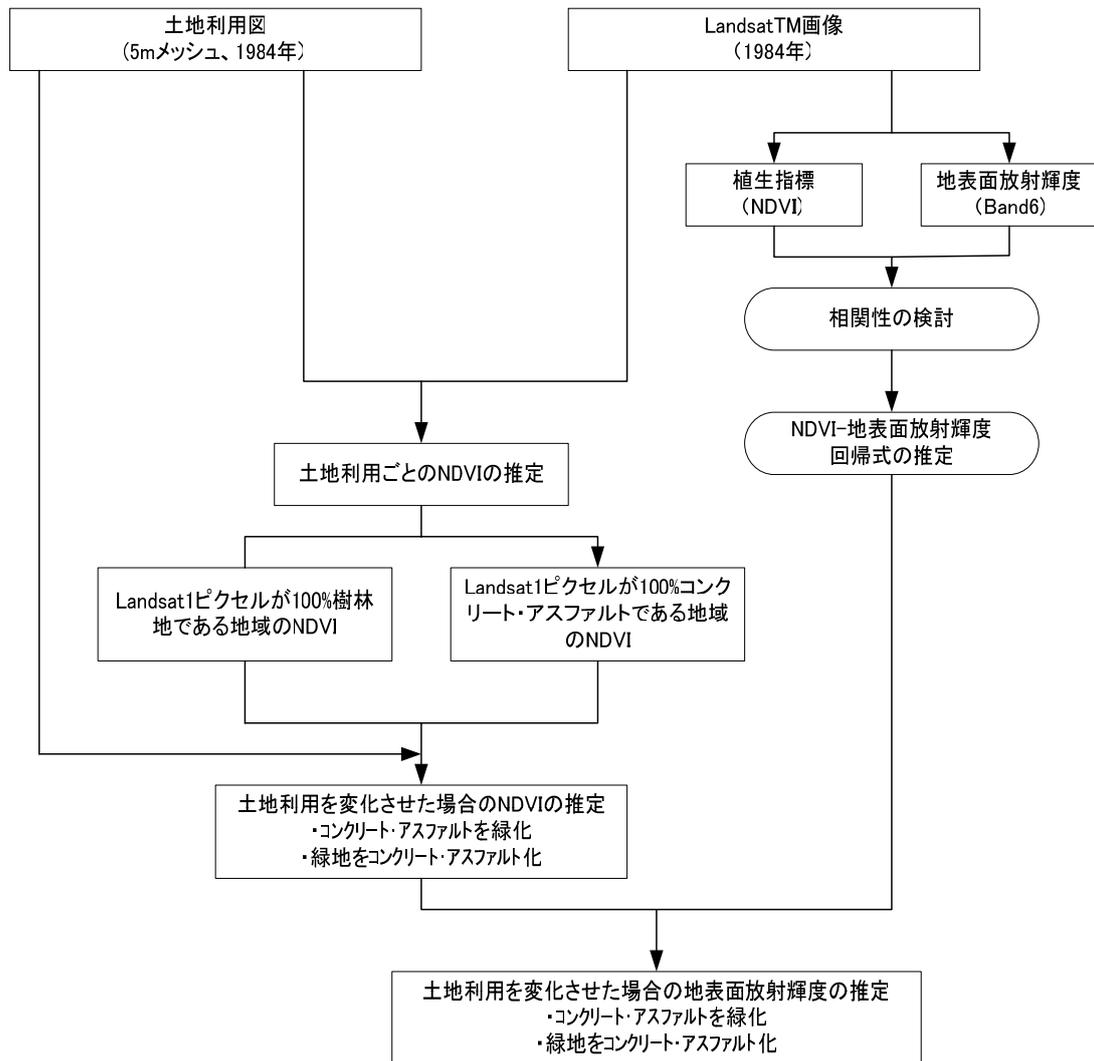


図 3.2-1 土地利用を変化させた場合の熱環境予測手順

3.2.3 LandsatTM を用いた赤外放射輝度の推定

一般に、都市の熱環境は、冬は人工排熱が相対的に都市の気温上昇に影響を与え、夏は太陽エネルギーを受けるコンクリート・アスファルト系の構造物の顕熱が卓越して大気 of 気温上昇をもたらしている。この現象を捉える手法として、衛星リモートセンシングは有用な解析ツールである。現在、熱赤外の波長帯に相当するセンサーを搭載している衛星は Landsat, NIMBUS, NOAA 等が挙げられるが、Landsat 衛星の空間分解能 120m は現在供用されている衛星の中でも高解像であり都市レベルの熱環境を計測する場合、十分な精度を有している。

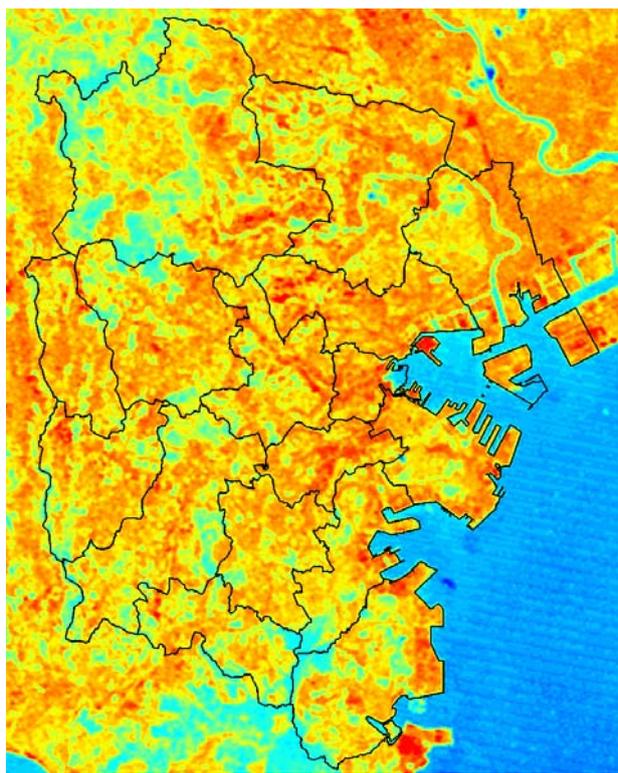
Landsat 衛星に搭載されているセンサーのうち、熱赤外に相当するセンサーは、Band6 である。Band6 から赤外放射輝度へと換算する変換式は、Landsat の供用元である NASA から

提示されている。赤外放射輝度 T (K) と LandsatBand6 の輝度値 V との間には、次式が成立する。

$$R = R_{\min} + \frac{(R_{\max} - R_{\min}) \times V}{D_{\max}} \quad \dots \dots \quad (3-1)$$

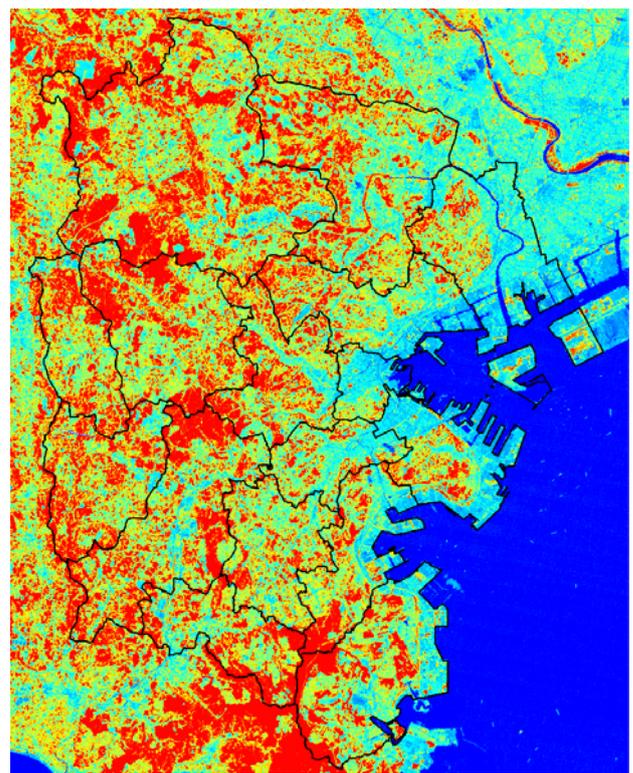
$$R = 5.1292 \times 10^{-5} T^2 - 1.7651 \times 10^{-2} T + 1.6023 \quad \dots \dots \quad (3-2)$$

なお、 $D_{\max}=255$ 、 $R_{\max}=1.896$ 、 $R_{\min}=0.1534$ である。式(3-1)、(3-2)より得られる赤外放射輝度は、大気の影響などにより必ずしも現地の表面温度を的確に表現しているとはいえないため、適用に際しては現地調査結果との検証が必要である。しかし、本論では、緑化や都市化（コンクリート・アスファルト化）が都市熱環境に与える影響を概略的に把握することから、横浜市全域の大気の様子が一定であると仮定して適用した。図 3.2-2 に、式(3-2)、(3-3)より算出した赤外放射輝度分布図を、図 3.2-3 に、NDVI 分布図を示す。



307 赤外放射輝度 322 (K)

図 3.2-2 赤外放射輝度分布図



-0.30 NDVI 0.44

図 3.2-3 NDVI 分布図

3.2.4 植物活力度 (NDVI) と Band6 の関係調査

画像上でランダムにサンプリングをおこない、このサンプリング地点における植物活力度と地表面温度を算出し比較をおこなった。図 3.2-4 に NDVI と地表面温度との相関関係を示す。本図の分布の特徴として大体 NDVI が上昇すると共に地表面温度は低下しているが、直線的な低下ではなく多次曲線的であることが読みとることができる。また植物活力度が 0.05 以下の場合、地表面温度と NDVI の関係はあまりないことがわかった。

次に、どの次元の曲線が本分布図をよく表現しているかの検討を統計ソフトで行った。その結果下記の 4 次式 (式 3-3) が最も相関係数が高いことが判明した。なお、式(3-3)で適用した 4 次式は経験式であり、適用範囲は $-0.1 < \text{NDVI} < 0.7$ である。

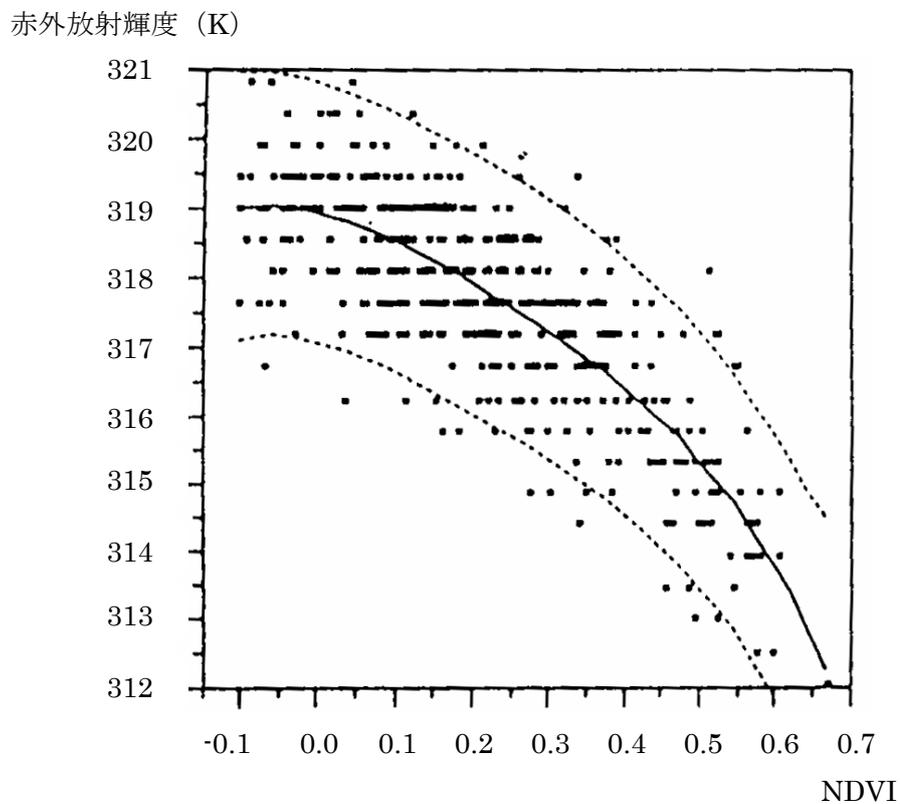


図 3.2-4 植物活力度 (NDVI) と Band6 の関係

$$\text{赤外放射輝度 (K)} = -45.038x^4 + 40.01x^3 - 17.307x^2 - 2.911x + 318.971 \cdots (3-3)$$

相関係数 $R=0.6458$

3.2.5 植物活力度の増減による温度予測シミュレーション

都市の熱環境を、衛星リモートセンシングとGISを組み合わせたシステムの中で、1)で算出した回帰式をモデル化して、土地利用の変更計画のシナリオに沿ったシミュレーションをおこなった。検討したシナリオは以下の2とおりである。

- ① 開発系土地利用（商業用地，工業用地，住宅地等）を緑化する。
- ② 有植生系土地利用—緑のオープンスペース（森林，田，畑等）を都市化する。

温度予測シミュレーションの手順は以下のとおりである。

1. LandsatTMの30mメッシュ全体の植物活力度（ $NDVI_{old}$ ）を算出する。
2. LandsatTMの30mメッシュの中にある土地利用5mメッシュの有植生地（EP）、及び非植生地（NP）の画素数を計測する。
3. 植物活力度を10%～30%変化させた場合の植物活力度の予測値（ $NDVI_{new}$ ）を次式により算出する。

緑地域を都市化させる場合

$$NDVI_{new} = NDVI_{old} - \text{緑地域の変化分} + \text{都市域の変化分}$$

都市域を緑化させる場合

$$NDVI_{new} = NDVI_{old} + \text{緑地域の変化分} - \text{都市域の変化分}$$

$$\text{緑地域の変化分} = (EP * 0.5) / 36 \quad \dots \dots \dots (3-4)$$

$$\text{都市域の変化分} = (NP * 0.1) / 36 \quad \dots \dots \dots (3-5)$$

土地利用計画（緑被率）の変化率を想定して5%きざみで緑化/都市化率を変化させた場合の温度分布とその変化率をシミュレーション結果から算出した。その結果、横浜市全域を対象として、夏期（8月）の晴天日の午前10:00（衛星ランドサットが横浜市上空を通過した時間）の気象条件で、市街化地区を10%、20%緑被率を増加させた場合、地表面温度は現状（気温換算：30.22℃）より-0.32℃（気温換算：30.12℃）、-0.89℃（気温換算：29.96℃）低下する。反対に緑地を10%、20%市街化させた場合、地表面温度は平均でそれぞれ+0.30℃（気温換算：30.30℃）、+0.53℃（気温換算：30.37℃）増加した（図3.2-5）。

次に、横浜市の中心部である中区を対象に緑被率を現況からさらに15%増加させるケースについて検討すると、屋上緑化による緑葉の潜熱フラックスの増加により夏季に地表面温度が区全体で平均0.8℃低下する効果が予測された（図3.2-6）（図3.2-7）。

日本の大都市圏の8月の平均気温は100年間で1℃～2℃上昇している。しかし、シミュレーション結果から、市街地の20%を緑化することで、ほぼ10年前の気温に戻すことが可能となる。しかし、現状の市街地を20%都市緑地に改変することは現実的には困難であるが、屋上緑化と都市緑地整備、道路緑化などを併用して目標に近づけることは可能である。例えば、駐車場や公園の緑被化や湾岸地域の都市緑地化、公共施設や新築建造物の屋上緑化は現実的な施策として可能な範囲にある。

このように、屋上緑化の各種代案をGISと衛星リモートセンシングを組み合わせることで、地域レベル（区、市レベル）でのクールアイランドの効果を定量的に評価することが可能である。今回の研究では、衛星画像とGISを用いて赤外放射輝度（地表面温度）という単位で都市の緑の増減による広域な熱環境を評価した。今後は、3次元乱流モデルなどの物理モデルにこの基礎情報を適用して、より詳細な解析を行っていく必要があると考えられる。

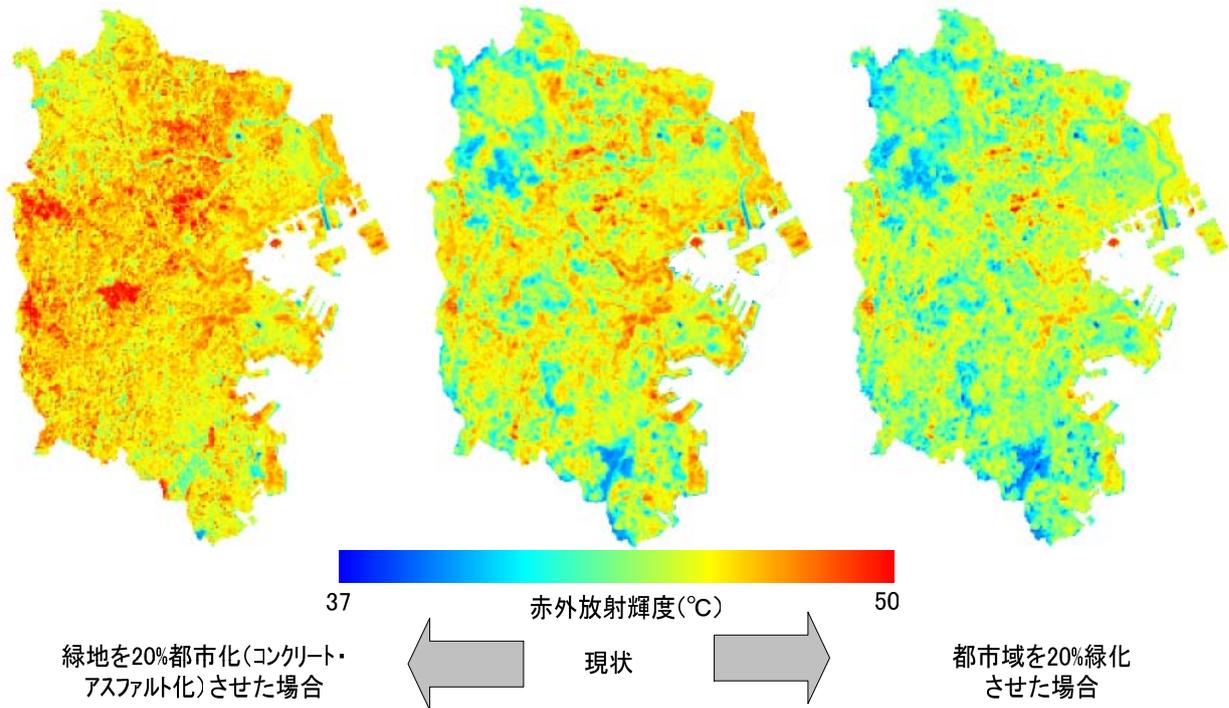


図 3.2-5 土地利用の改変による赤外放射輝度予測（横浜市）

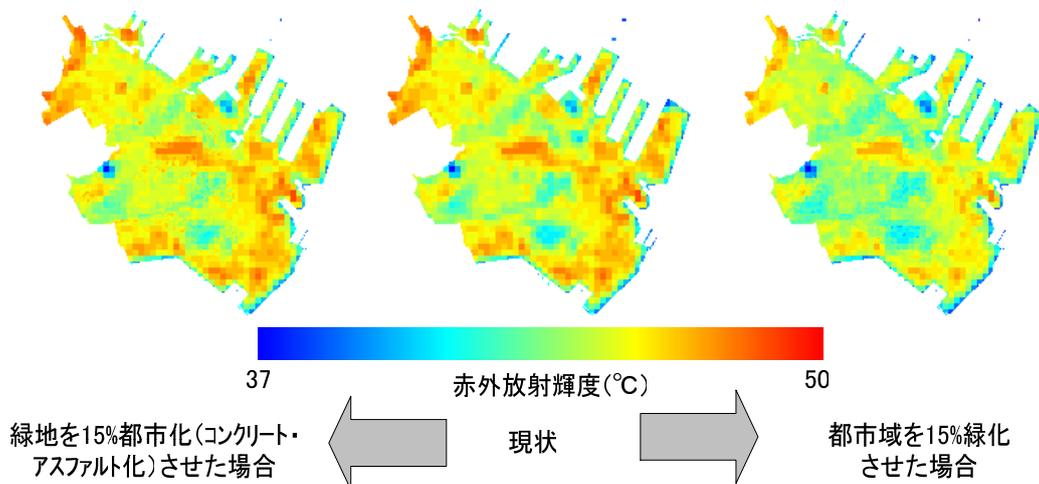


図 3.2-6 土地利用の改変による赤外放射輝度予測（横浜市中区）

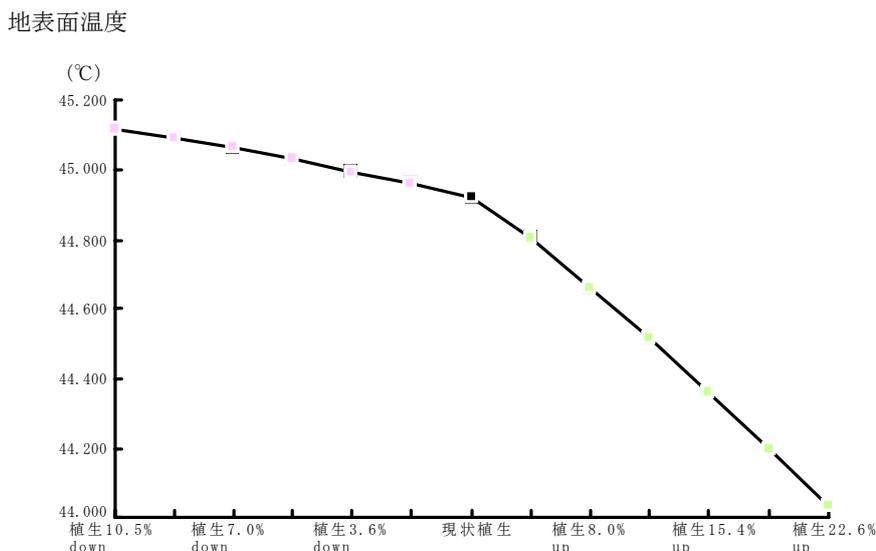


図 3.2-7 土地利用の改変による赤外放射輝度予測結果 (横浜市中区)

3.3 風の影響を考慮した都市緑地のクールアイランド効果

夏季 (8月) の昼間のヒートアイランド現象への寄与の大きいアスファルト舗装道路面やコンクリート建物などの地表面の熱特性に起因する顕熱輸送と、緑地や水面の有する潜熱輸送による気温調整効果がどのように地域レベルの温暖化に影響しているかを分布型 RS-GIS シミュレーションモデルで検討した。

都市計画的土地利用データの土地利用基本分類を地表面被覆の熱特性を代表する空間単位として、それぞれに基本的な熱パラメータである、1) 熱伝導率、2) 熱容量、3) 蒸発能を与え、LandsatTM が飛来した 1989 年 8 月 15 日 10 時の日射量に相当する赤外放射輝度のシミュレーションを行い、代表的な地表面被覆の実測値と計算値が適合するように、1)~3) の係数の設定を行った (表 3.3-1)。設定した各熱環境係数と土地利用-GIS を組み合わせ、日射量の変化に対応する赤外放射輝度の時間変化についてシミュレーションを行う。次のステップとして、対数則を仮定して風速 $3.0\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$ を初期地上風速として均一に与えた場合の気温の時間変化を計算した。ADI 法による差分計算は、日の出直前の午前 5 時から 10 分間隔、支配方程式は山田・カラーの 3 次元クロージャーモデル (Level-2) である。GIS 土地利用メッシュと RS-GIS 都市熱環境モデルを組み合わせることによって、地表面土地被覆状態を変化させる都市開発や緑化事業によって、どの程度地域的な気温が変化するかを予測することが可能となる。

図 3.3-1 は、住宅団地と大規模緑地と高層商業ビル群が共生するニュータウンにおける都市熱環境シミュレーションの一例である。

14 時の状況を判読すると、都市緑地がクールアイランドとなっており、都市緑地からの冷氣 (28°C) が若干ながら風下側へと移動している状況が読み取ることができる。また、

高層商業ビル群と駐車場は気温も 34℃以上でありヒートアイランドを形成している。都市緑地とビル群の気温差は 6℃であった。ビル群の温度の高い状況は夜間（23 時）にかけても継続し、ビル群中心部では気温 27.5℃以上と熱帯夜となっている。これに対し、公園緑地は 24℃以下であり、夜間における熱帯夜を緩和する冷房源となっている状況が読み取れる。このように、都市緑地は都市における昼間の気温を低下させているばかりでなく、夜間にかけて熱帯夜を緩和する効果を有している。

表 3.3-1 都市計画的土地利用区分と熱伝導率、熱容量、蒸発能

都市計画的 土地利用区分	熱伝導率	熱容量	蒸発能
	($Wm^{-1}k^{-1}$)	$Jcm^{-3}k^{-1}$	-
山林	1.2	3.8	0.9
田	1.8	4.5	1.5
畑	0.8	2.5	0.7
造成中地	0.6	1.8	0.3
空き地	0.4	3.0	0.4
工業用地	0.2	1.8	0.0
住宅地	0.4	1.8	0.1
商業	0.2	1.8	0.0
道路	0.4	1.8	0.0
公園	0.8	3.8	0.8
公共用地	0.2	1.8	0.0

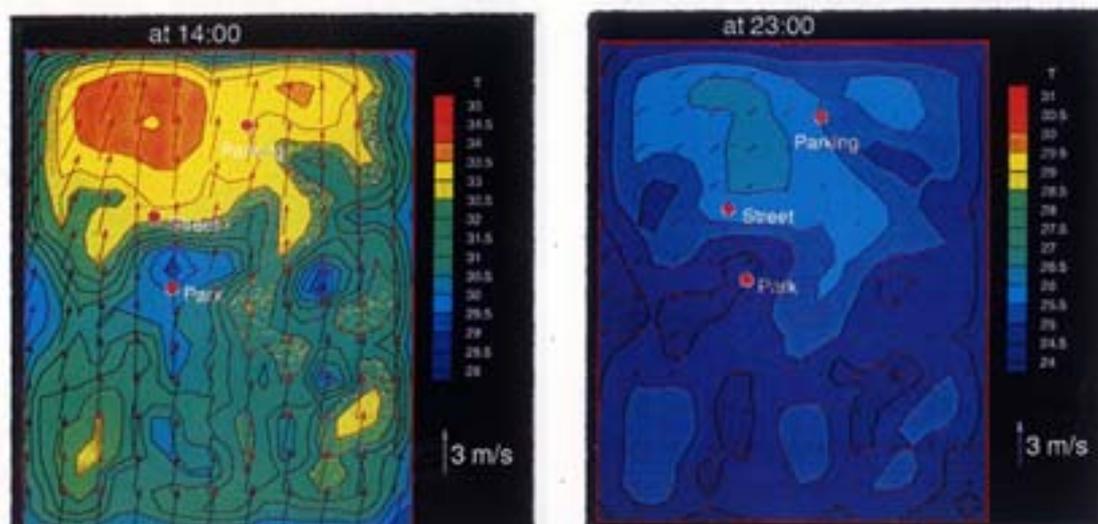


図 3.3-1 ニュータウンにおける三次元乱流モデルによる熱環境シミュレーション

一般に、大都市における局地的気候をみてみると、風速が大きくなると大気が乱流となり、ヒートアイランドは拡散されてしまう特徴があると言われている。本シミュレーションでは、風速を変化させた場合の大都市の気温分布について検討した。その結果、風速が $1\sim 3m\cdot sec^{-1}$ ではコンクリート・アスファルト系の土地利用上での気温は高く、樹林地上の気温が

低くなっており、ヒートアイランド現象は維持されることが判明した。これに対し、風速が $4\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$ 以上では大気が乱流状態となったことが示された。

3.4 本章のまとめ

横浜市を対象とした広域の都市熱環境解析の結果、以下の事項が明確となった。

- ・ 横浜市の人工排熱は、1) 都市計画的土地利用/建築物から発生する $59\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、2) 自動車排熱から $30\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、3) 3ヶ所の火力発電所からのものが $55\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ である。発電所をのぞく人工排熱の合計量は $85\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ であり、第一次エネルギー投入量のうち、20%がクーラー等の都市人工排熱、10%が車両からの排熱、19%が発電所排熱により消費されている。
- ・ エネルギー使用量の月単位の変化から人工排熱量の季節変動を検討した。横浜市の人工排熱が卓越する冬期の1月がピークで1.20倍の $71\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、夏期の8月はちょうど平均値で $59\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ と算出された。環境省の調査によると、夏季の顕熱フラックスは東京と平均で $90.5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ であり⁵⁾、夏季におけるヒートアイランドは顕熱フラックスによる影響が強い。これに対し、冬季のコンクリート、裸地面の顕熱フラックスの計測結果によるとコンクリートは $50\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、裸地は $13\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ であり、冬季のヒートアイランドは、人工排熱が主要な原因となっている。
- ・ 土地利用計画（緑被率）の変化率を想定して5%きざみで緑化/都市化率を変化させた場合の温度分布とその変化率をシミュレーション結果から算出した。その結果、横浜市全域を対象として、夏期（8月）の晴天日の午前10:00（衛星ランドサットが横浜市上空を通過した時間）の気象条件で、市街化地区を10%、20%緑被率を増加させた場合、地表面温度は現状（気温換算： 30.22°C ）より -0.32°C （気温換算： 30.12°C ）、 -0.89°C （気温換算： 29.96°C ）低下する結果となった。横浜市の平均気温は100年間で 2.6°C 上昇している。しかし、シミュレーション結果から、市街地の20%を緑化することで、ほぼ10年前の気温に戻すことが可能となる。
- ・ 住宅団地と大規模緑地と高層商業ビル群が共生するニュータウンにおける都市熱環境シミュレーションの結果、昼間（14時）の状況を判読すると、都市緑地がクールアイランドとなっており、都市緑地からの冷気（ 28°C ）が若干ながら風下側へと移動している状況が読み取ることができる。また、高層商業ビル群と駐車場は気温も 34°C 以上でありヒートアイランドを形成している。都市緑地とビル群の気温差は 6°C であった。ビル群の温度の高い状況は夜間（23時）にかけても継続し、ビル群中心部では気温 27.5°C 以上と熱帯夜となっている。これに対し、都市緑地は 24°C 以下であり、夜間における熱帯夜を緩和する冷房源となっている状況が読み取れる。このことから、都市のまとまった緑地は、周辺地域の冷却源となるだけでなく、熱帯夜を緩和する効果を有する。
- ・ 東京都は、ヒートアイランド化防止のため屋上緑化形成の公的な補助制度を設けてお

り、公共施設を中心として数多くのビルに屋上緑化が形成されつつある。しかし、多くの屋上緑化はヒートアイランドを抑止する効果はあるものの、地上より高い位置に形成されているため、多くの人々の活動場から断絶され利用率がきわめて少なく、都市景観的にみても人間の目から見れば都市を美しくする手段とはなっていない。また、生物生態系の視点から見ると、生物が自由に移動でき生存するためには都市緑地のようにある程度の範囲を持ったエコトープとしての緑が必要である。21世紀は地球環境の時代、持続可能性が重要なキーワードといわれているが、都市域においても人間のみがサステイナブルであるのではなく、多様な生物との共存にも新たな配慮が必要と考えている。ある程度の範囲を持ったエコトープとしての緑が分布する都市緑地は、ヒートアイランド緩和だけでなく、生物生態系・景観の視点からも都市に必要な構成要素である。

第4章 都市緑地のクールアイランド効果の評価モデル

4.1 都市緑地のクールアイランド評価の着目点

都市緑地が周辺熱環境に影響を与える効果としては、直接的な効果として、植物の蒸散効果による気温低減効果（蒸発潜熱増加効果）のほか、コンクリートやアスファルトだった地域が植物で被覆されることによる顕熱フラックスの減少（対流顕熱削減効果）、また樹木が植栽されることにより発生する陰が表面温度を低下させる効果（輻射熱減少効果）があげられる。また、間接的な効果としては、室内の温度が低下し冷房等の空調機器の使用時間が減少することによる人工排熱の減少及び空調機器からの蒸発による人工潜熱の発生や、全体的なエネルギー使用量の減少に伴う発電所からの人工排熱量の減少が考えられる。上記の直接的な効果および間接的な効果を総称してクールアイランド効果と定義されている（図 4.1-1）。本論文では、これらの広義な意味でのクールアイランド効果のうち、植物の蒸散効果による気温低減効果（蒸発潜熱増加効果）のみの狭義のクールアイランド効果に着目する。

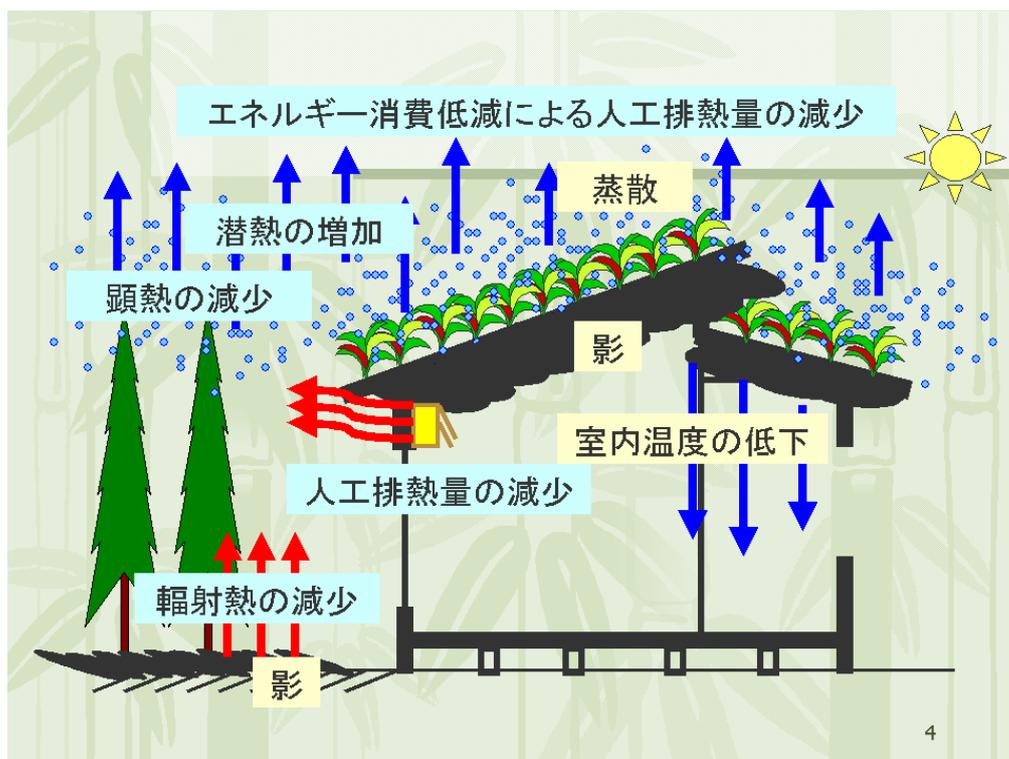


図 4.1-1 都市緑地のクールアイランド効果のメカニズム

4.2 都市緑地のクールアイランド効果の評価モデルの概要

本論で提示するクールアイランド効果の評価モデルの概要を図4.2-1に示す。クールアイランド効果の評価モデルの概要は、はじめに、東京都多摩市に位置する多摩中央公園と高知県南国市の石土池で実施した熱環境調査から熱収支式及びバルク式により土地被覆ごとの潜熱フラックスを算定する（第5章）。次に、樹木が生長することによる潜熱フラックスの増加効果について、クスノキを対象に航空機MSSから算定できるNDVIを用いてモデル化し（第6章）、都市緑地の土地被覆を変化させた場合での10年から20年の時間スケールでの潜熱フラックスの総量を貨幣価値に換算することで都市緑地のクールアイランド効果の経済性を推定する（第7章）。

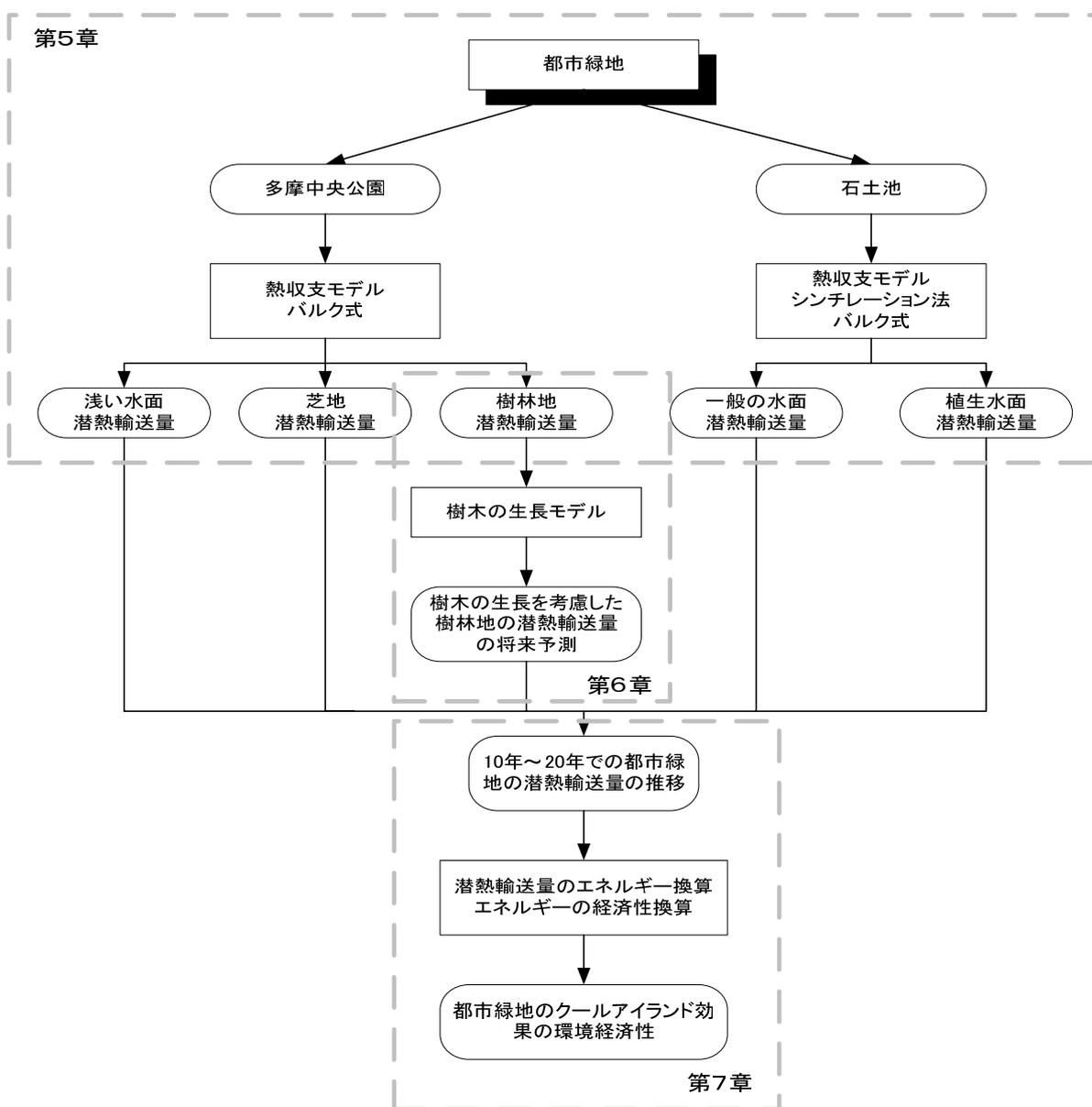


図4.2-1 クールアイランド効果の評価手順

第5章 都市緑地のクールアイランド効果の定量化

クールアイランド効果は、水滴が気化する際に周辺の空気から熱を奪い気温を低下させる効果であり、樹木の葉や芝地、水面が主な被覆項目である。都市緑地が周辺熱環境を緩和する効果を検証する場合、都市緑地を構成する被覆のクールアイランド効果を評価する必要がある。また、そこで、本論では東京都多摩市の「多摩中央公園」を対象に、樹林地と芝地、水面のクールアイランド効果を定量化した。また、緑地などに配置されている水面は、浅く非対流性の水面の他、多様な水草で被覆された池も見られる。多摩中央公園に設置している池は非対流性で水深 50cm の浅い水面であり、多摩中央公園の池のみで水面の熱環境特性を討論することはできない。よって、水面の熱環境特性については、多様な植生で覆われ、水深が 1m~5m の比較的深い雨水調整池である高知県南国市の「石土池」において熱環境調査を実施し、水深の深い水域、植生で覆われた水域のクールアイランド効果を定量化した。

多摩中央公園は、多摩ニュータウンの造成に伴い新規に開発された都市緑地であり、①緑地の周囲は商業施設や住宅地で囲まれており都市緑地のクールアイランド効果が明確に把握できること、②広さ 10ha の比較的規模を持ったオープンスペースであること、③多摩中央公園は樹林地や水面、芝地、構造物など都市緑地を構成する典型的なパーツがすべて揃っている。石土池は、周辺の十市パークタウンの造成に伴いとして新規に整備された雨水調整池であり、池の南と北側は住宅地が分布し、東・西が基本的に樹林帯である。石土池は、①当地の夏季の気候特性として日中は南風が卓越し、東西に分布している樹林帯の影響を受けずに池のみのクールアイランド効果が計測可能であること、②石土池の池面は抽水性水草（ハス）、浮遊性水草（ホテイアオイ）、浮葉性水草（ヒシ、ガガブタ）などがほぼ均等に分布し、水界植生の多様性と豊かさは都市緑地の公共水面設置において理想に近い。よって、本論の対象地である「多摩中央公園」と「石土池」は、都市緑地のクールアイランド効果を評価するための代表モデルケースとして位置づけている。

5.1 樹木と浅い水面を含む都市公園の熱環境特性の定量化

5.1.1 解析方法

5.1.1.1 解析の考え方

多摩中央公園を対象地として樹林地や芝地、水面を対象に熱環境調査を実施した。検討手順は、はじめに、多摩中央公園の熱環境の現状の把握および熱環境予測モデル構築のための基礎情報の取得を目的として、多摩中央公園を対象に 24 時間連続した熱環境調査を実施し、都市緑地のクールアイランド効果の現状を把握した。本公園のクールアイランド項目は樹木、芝地、水深 50cm の非対流性の水域であり、多摩中央公園のクールアイランド効果の定量化の視点は、1) 樹木や芝地、水面のクールアイランド効果の検証、2) 水深が浅い場合のクールアイランド効果の影響、の 2 点とした。

5.1.1.2 解析対象地の概要

多摩中央公園は、多摩ニュータウンの商業の中心地である京王・小田急多摩センター駅に隣接した約10haの典型的な多目的公園である。敷地内には広大な芝生の広場や植物園、日本庭園が配置されているとともに、公園中央部に深さ50cm程度の浅く対流性のない池が存在し、パルテノン神殿のようなコンクリート構造物が比較的多い。本公園は、遊具類が無く、地域住民の憩いとコミュニケーション促進としての機能を併せ持つ都市緑地として位置づけられている(図5.1-1)。多摩中央公園の被覆構成は表5.1-1のとおりである。表に示すように、公園の約86%は樹林地や芝地、水面など都市気候を緩和する被覆により覆われている。



図 5.1-1 多摩中央公園 (航空写真)

表 5.1-1 多摩中央公園の被覆構成

土地利用	土地利用面積 (ha)
樹林地	5.88
芝地	1.90
浅い水面	0.75
裸地	0.04
コンクリート・アスファルト	1.43
合計	10.00

5.1.2 都市公園を対象とした熱環境調査

熱環境調査は、都市緑地のクールアイランド効果を評価する目的から、夏期の晴天日を選んで実施した。気象観測は1994年8月26日（金）23:00から開始し、28日（日）3:00で終了した。27日の日平均気温は27.2℃、平均風速3.0mであった。定点観測は、多摩中央公園内の芝地の中心部と樹林地内および福武書店屋上（観測高度113.6m）にて行った。また、移動観測は、公園内（池の周囲と公園周辺）・街中（歩道と周辺一般道路）・周辺の市街地（車による移動観測）の5種類行った。地点毎の観測項目を表5.1-2に、使用機器の一覧を表5.1-3に示す。芝地の定点観測では、気温と相対湿度については地表面付近（0.1m）と高度1.5mの2高度にて、地温も-0.05mと-0.10mの2深度にて毎時の測定を行った。なお、現地調査に併せて、多摩中央公園の北西部に位置する交通公社の駐車場より、24時間熱赤外面像を30分間隔で撮影した。

表 5.1-2 観測地点ごとの観測項目一覧

観測点	気温	湿度	風向 風速	地表面 温度	長波放 射	日射	アルヘット	水温	サーモ フロー	地温
周辺の市街地（車の移動観測）	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—
公園内（公園周辺）	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—
街中（周辺一般道路）	○	○	—	○	—	—	—	—	○	—
街中（歩道）	○	○	○	○	—	—	—	—	—	—
福武書店屋上	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—
駐車場	—	—	—	○	—	—	—	—	—	—
森林	○	○	—	○	—	—	—	—	—	—
芝地	○	○	○	○	○	○	○	○	—	○

表 5.1-3 使用測器一覧

観測点	測器名
周辺の市街地（車の移動観測）	クリモマスター（カノマックス）
公園内（公園周辺）	サーモハイグロメータ（神巢）
街中（周辺一般道路）	サーモハイグロメータ（神巢）
	サーモフロー
街中（歩道）	表面温度計（KEYENE）
	温湿度計（東京計測）
福武書店屋上	風速計
	温湿度計（ロガー付き）
駐車場	風速計
森林	赤外線カメラ（日本アビオニクス）
	MDL
芝地	表面温度計
	赤外放射計（英弘）
	放射収支計（英弘）
	アルヘットメータ（英弘）
	日射計（太田計器）
	温度湿度大気圧自記計
	記録計（チノー）
	温度計
風速計	

現地気象観測の結果、全天日射量は6時から正の値を示し、12時に最大値 $781\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ を示した。同じく正味放射量は最大値出現時刻12時で $616\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ であった。長波放射量の日変化はほとんどなく、昼夜ともに $400\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 程度であった。地表面付近の気温は、全天日射量の増加とともに増加・減少しており、最大値は12時の 35.1°C であった。また、1時間遅れで高度1.5mの気温が最大値となり 32.4°C を記録した。この時間のずれは、太陽放射エネルギーがまず地表面を暖め、その一部が大気や地面を暖めるのに費やされるために起きるもので、地温についても同様の現象が認められた。深度-0.05mの地温は15:00に最大値 30.2°C となり、深度-0.1mの地温はさらに2時間遅れで最大値 28.5°C を記録している。なお、気温や地温に比べ、水温は日変化が小さい。これは地表面の熱物理特性に依存している。土（十分に湿った土壌）は熱伝導係数が2.0で、コンクリートは1.7、水0.57である。土が暖まり易く冷めやすいのに対し、水は暖まりにくく冷めにくいいため、日変化が少なくなっている。地表面からの熱の移動は、風による大気の乱流によって行われる。芝地における風向・風速の日変化をみると全天日射量の増加とともに、風速は増加し、それに伴って地表面付近の気温および高度1.5mの気温の上昇が認められる。日中の最多風向は南西で、8月27日の最高風速は 7.3m であった。

5.1.3 都市緑地の地表面温度特性

多摩中央公園の土地被覆ごとの表面温度は、前述の赤外放射温度計（NEC 三栄製 TH-5100）を用いて1時間おきに24時間連続して取得した。図5.1-2に、土地被覆ごとの表面温度結果を、以下に、その特徴を示す。

- (1) 樹木や芝地等の緑地系土地被覆は、コンクリート・アスファルト系土地被覆と比較した場合、夜間でも $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ 、昼間では最大 14°C 地表面温度が低いことがわかった。よって、緑地系土地被覆は昼夜を問わずにクールアイランドとしての効果を顕著に持っている。
- (2) 緑地系土地被覆項目の中では、芝地よりは樹林地の方が地表面温度が低く、クールアイランド効果が大きいことが示された。
- (3) コンクリート・アスファルト系の人工構造物は、夜間でも地表面温度は 27°C 以上と高い水準にある。これは、昼間太陽光によって十分暖められた表面が夜間徐々に放熱し、明け方まで続くので結果として地表面温度が低下しない原因となっている。
- (4) 底面と側面をコンクリートで囲まれた水面の表面温度は、昼間で 30°C を超え夜間でも 25°C と温度の高い状態が明け方まで継続している。これは、池の3面がコンクリートで構成されているため、昼間の貯熱量が底面のコンクリートを暖める熱量にも使われ、夜間にコンクリートから水塊へと熱が移動することにより、水温が高い傾向が明け方にかけても解消されないことが原因となっている。

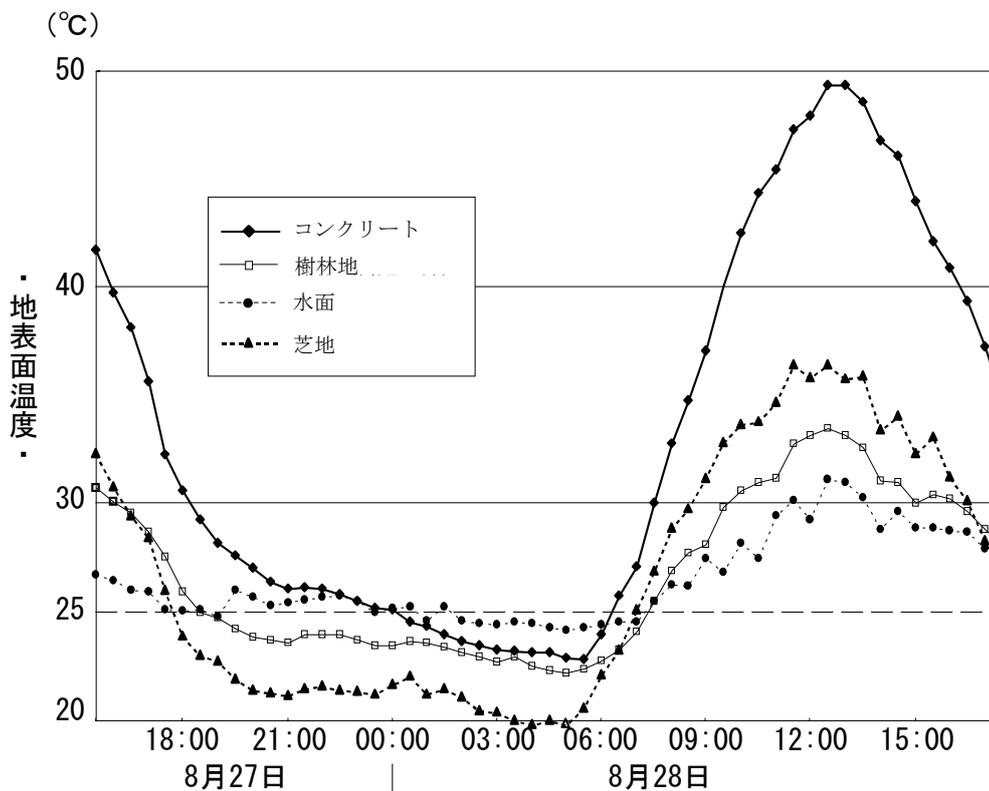


図 5.1-2 土地被覆ごとの表面温度結果

5.1.4 樹木と浅い水面を含む都市緑地の熱環境特性

次に、1994年8月27日に行った現地気象データをもとに、土地被覆別熱収支の評価と蒸発量算定を行った結果について述べる。

5.1.4.1 土地被覆別の熱収支の推定手法

地表面が太陽から吸収する正味放射エネルギーは、地表面の土地被覆状況すなわち、地表面の物理特性によって異なる。地表面のアルベド (α) と長波に対する射出率 (黒体度: ϵ) を土地被覆別に仮定することによって、ある代表点の放射収支結果から土地被覆別正味放射を算定することができる。算定のフローチャートを図 5.1-3 に示す。

地表面が吸収する太陽エネルギー (正味放射量: R_n) は、地表面から大気を暖めるのに使われるエネルギー (顕熱フラックス: H) と水の蒸発散に消費されるエネルギー (潜熱フラックス: LE)、そして地表面から地中に入るエネルギー (地中伝導熱: G) に分配される。 G は地中熱流量 (貯熱量) ともいい、地中温度 (浅い水面の場合は水面) を上昇させるエネルギーである。これに、周辺空気塊からの風による移流 (Q) を考慮するならば、地表面熱収支は式(5-1)で表される⁸⁾。

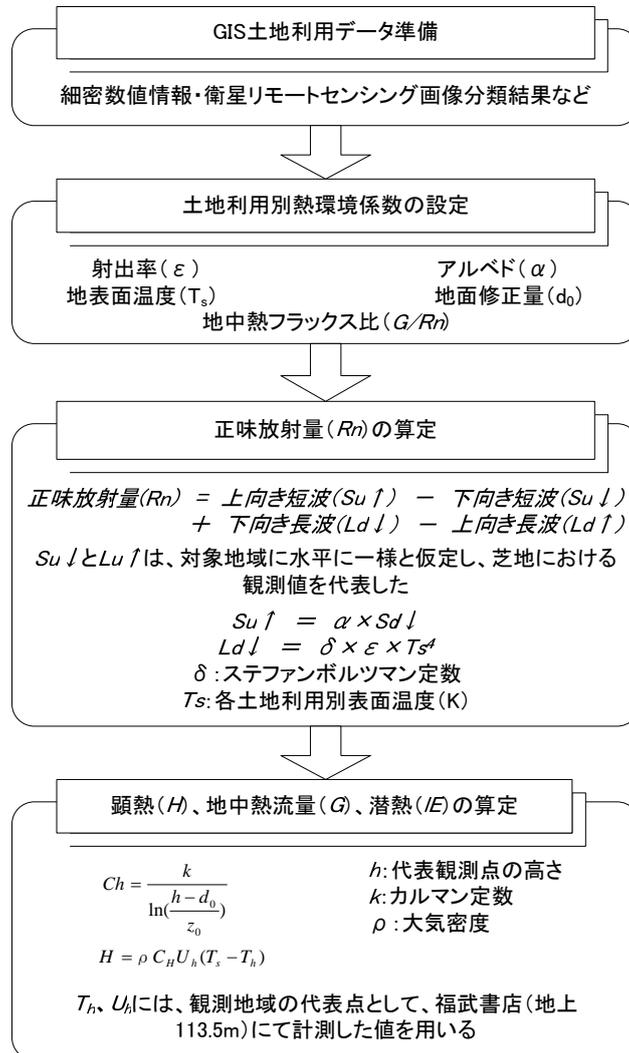


図 5.1-3 熱収支算定フロー

$$R_n = H + LE + G \pm Q \quad \dots \quad (5-1)$$

また、地表面が太陽から吸収する正味放射量は、地表面の土地被覆状況すなわち、地表面の物理特性によって異なる。地表面のアルベド(α)と長波に対する射出率(黒体度: ε)を土地被覆別に仮定することによって、ある代表点の放射収支結果から土地被覆別の正味放射量を算定することができる。

正味放射量は全天日射量をS↓、大気からの長波放射(赤外放射)量をL↓、地表面温度に対する黒体放射をδTs⁴とした場合、次式で定義される。

$$R_n = (1 - \alpha) S \downarrow - \epsilon (\delta T_s^4 - L \downarrow) \quad \dots \quad (5-2)$$

ここで、 δ は Stefan-Boltzmann 定数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)、 T_s はそれぞれの地表面における有効赤外地表面温度 (K) である。

つぎに、対象地域上空高度 113.6m にて、気温・風速は対象地域内に一様であると仮定し、颯武書店屋上の観測点の値を代表値として次の式にもとづき顕熱フラックスを算定した。

$$H = C_p \rho C_h U_{113.6} (T_s - T_{113.6}) \quad \dots \quad (5-3)$$

ここで、 $C_p \rho$ とは空気の体積熱容量 (1 気圧、20°C で $1.21 \times 10^3 \text{JK}^{-1}\text{m}^{-3}$) であり、 C_h とは顕熱フラックスのバルク係数 (無次元)、 $U_{113.6}$ および $T_{113.6}$ はそれぞれ代表点の風速 (m/s) と気温 (K) である。なお、顕熱フラックスのバルク係数 C_h は地表面の粗度に依存し、次式で与えられる。

$$C_h = \left(\frac{k}{\ln\left(\frac{113.6-d}{Z_0}\right)} \right)^2 \quad \dots \quad (5-4)$$

式(5-4)中の k とはカルマン定数 (0.4) で、 d および Z_0 は土地被覆毎の地面修正量と粗度長 (m) である。

式(5-1)～(5-4)においての各種係数の設定に当たっては、それぞれの土地被覆毎の有効赤外地表面温度はサーモフローの観測結果を用い、アルベドと射出率は Morgan ら (1977)¹⁾ および川島 (1986)²⁾、杉田ら (1992)³⁾ が検討した係数を参考に、地面修正量と粗度長については、竹内・近藤(1993)⁴⁾ や近藤(2000)⁵⁾ が提示した地表面状態ごとの係数設定を基本として、Morgan ら (1977)¹⁾ を参考にそれぞれ設定した。また、地中伝導熱は川島 (1986) が指定した正味放射量に対する割合²⁾ を参考に土地被覆毎に係数を設定し算出した(表 5.1-4)。

都市緑地の熱環境特性は、式(5-2)から式(5-3)によって土地被覆別の正味放射および顕熱フラックス、地中熱流量を求め、式(5-1)の熱収支式によって潜熱フラックスを算出した。なお、アスファルトの潜熱フラックスを0とした。式(5-4)から算定したバルク係数は、芝地 0.00314、樹林地 0.0033 であった。

表 5.1-4 土地被覆別地表面物理特性^{1)~5)}

土地利用	アルベド	射出量	地面修正量(m)	粗度長(m)	G/Rn
樹林地	0.16	0.99	0.10	3.50	0.08
芝地	0.16	0.99	0.09	0.20	0.10
浅い水面	0.09	0.99	0.00	0.00	0.65
裸地	0.35	0.98	0.02	0.15	0.20
コンクリート・アスファルト	0.30	0.96	-	-	0.35

5.1.4.2 都市緑地の顕熱・潜熱の評価

式(5-1)に従って求めた土地被覆別正味放射量は、12時の値が芝地 $616.0\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、樹林地 $660.2\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、コンクリート・アスファルトでは $326.9\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ と計算された(図5.1-4)。これはコンクリート・アスファルトが芝地や樹林地の約2倍ものアルベドをもち、かつ地表面温度が非常に高いことに起因する。顕熱フラックスは、コンクリート・アスファルトが最も高く $212.5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (12時)であった。通常、顕熱フラックスの最大値出現時刻は正味放射のそれよりも1~2時間遅れて現れる。この現象は、太陽エネルギーによりまず地表面が暖められ、その熱エネルギーの一部が顕熱フラックスとなって大気中に輸送され、大気温度(気温)を上昇させるため起こるものである。今回の調査結果でも、コンクリート・アスファルトをのぞく4つの地表面において同じ現象が認められた。なお、12時から14時までの正味放射合計に対し顕熱フラックス合計が占める割合は、芝地が17.5%、樹林地が13.7%、裸地62.0%、コンクリート・アスファルト63.8%であった。コンクリート・アスファルト、裸地は正味放射量が小さく評価されているにもかかわらず、顕熱フラックスはその値が芝地・樹林地を上回っている。さらに、正味放射量の60%以上のエネルギーを消費していることから、都市の大気熱環境に与える影響は大きい。

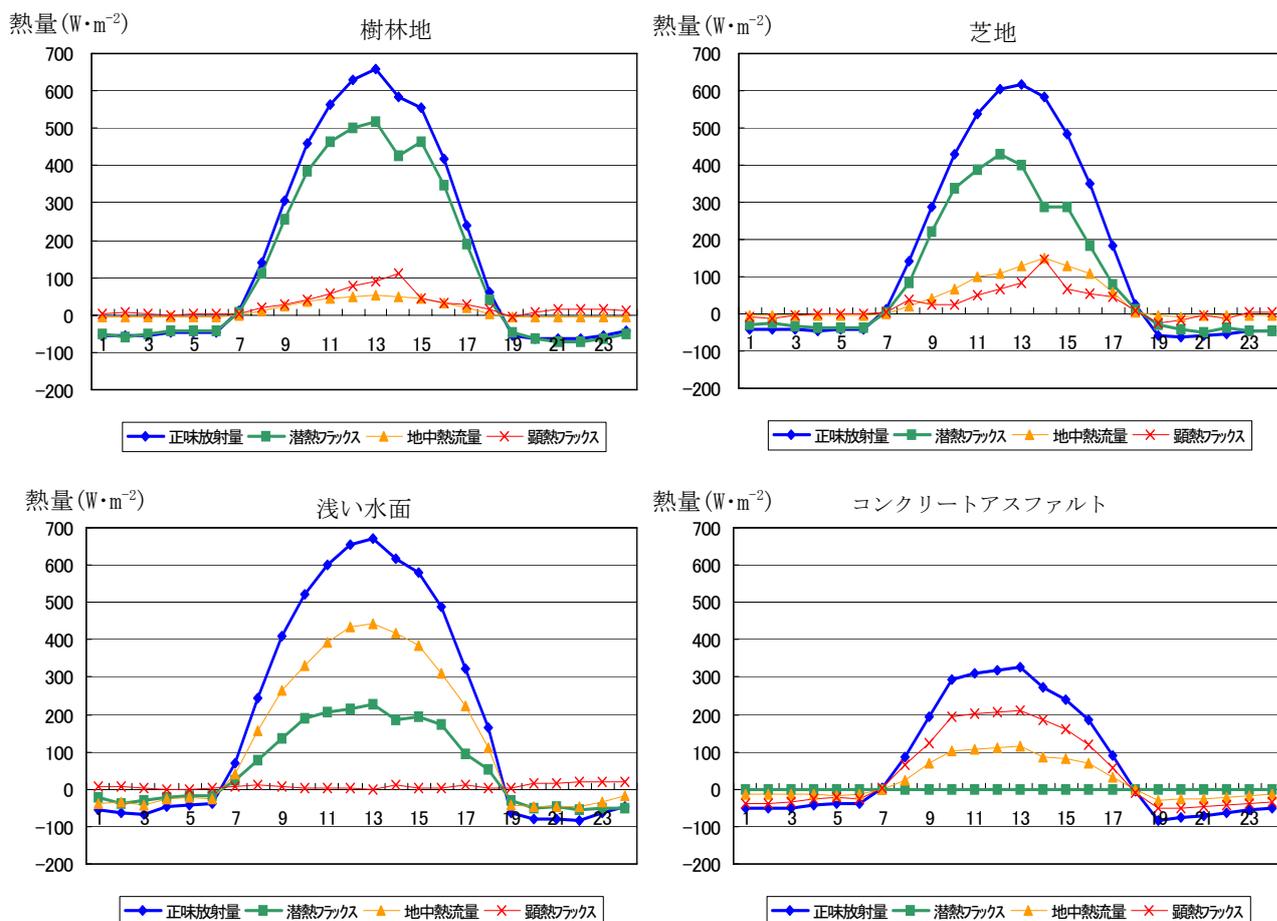


図 5.1-4 土地被覆別熱収支計算結果 (多摩中央公園、1994年8月27日)

潜熱フラックスは、樹林地が最も大きな値を示し、12時に $518.77\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ であった。ついで芝地が $401.27\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ であった。一方、浅い水面では、正味放射の大部分（約65%）が水温を上昇させるための貯熱量に費やされるために、日中の蒸発に使われるエネルギー（潜熱フラックス）は緑地と比較して非常に小さく、 $230.47\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ （12時）にすぎなかった（表5.1-5）。

表 5.1-5 土地被覆別潜熱輸送量算定結果（多摩中央公園）

		樹林地	芝地	水面	裸地	コンクリート・ア スファルト
12時	潜熱フラックス ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	518.77	401.27	230.47	108.00	0.00
	蒸発散量($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	0.75	0.58	0.33	0.16	0.00
日全体	蒸発散量(mm)	5.28	3.90	2.43	0.87	0.00

5.2 多様な植生で覆われた雨水調整池での熱環境特性の定量化

5.2.1 解析方法

5.2.1.1 解析の考え方

5.1節では、多摩中央公園を対象に熱環境調査を実施し、土地被覆ごとの熱環境特性を定量化した。この際、水域の熱環境特性は、日中に蓄えられた熱が夜間に放射されず“湯たんぽ”状態となって明け方まで持続する特性が得られた。この結果は、多摩中央公園に位置する非対流性の浅い水深の池を対象としたため、限定的であると考えられる。そこで、本論では、水深1～5mの雨水調整池を対象に熱環境調査を実施し、一般的な水域の特性を明確化するとともに、湖面を被覆する水草が水辺空間の熱環境にどのような影響を与えるかについて検討した。

5.2.1.2 解析対象地の概要

石土池は、高知県南国市に位置し、十市パークタウンの宅地開発に伴う雨水調整を目的として、平成2年に従来の池を約4倍（約25ha、周囲は約4km）に広げて整備された半人工池である。池の北側には、十市パークタウンからの排水が流入している十市川が流れているが、図5.2-1 流入地点から石土池に流入させている。池への他の流入源としては、池への直接の降雨、池底からの湧水、隣接する山からの流入があげられる。



図 5.2-1 解析対象地（石土池）

石土池は、雨水調整池としての機能を重視して施工されたが、ハスやホテイアオイ等の水生植物が繁茂し、カメ、ブラックバス、ライギョが生息、冬には水鳥が渡来するなど、自然生態的な多様性を持っている。8月における石土池の湖面被覆は、深い場所の水面を除い

て、池の西部と南部はハス、東部はヒシとアサザの混合、池の岸に沿ってホテイアオイが群生し、池の水面の約80%が植生で覆われている状態となっている（図5.2-2, 表5.2-2）。

表 5.2-1 湖面被覆面積（2003年8月）

	被覆面積 (ha)	面積率 (%)
ホテイアオイ	2.58	10.9
ハス	8.15	34.4
ヒシ・ガガブタ	8.56	36.1
植生被覆面積合計	19.29	81.4
湿地帯	0.57	2.4
水面	3.84	16.2
石土池 湖面面積合計	23.70	100

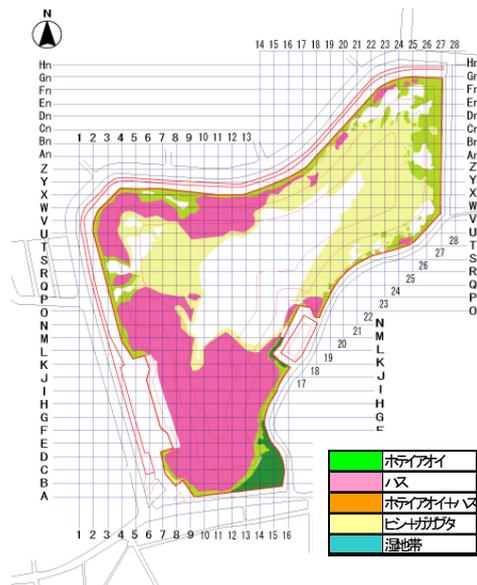


図 5.2-2 湖面被覆図(2003年8月)

5.2.2 熱環境調査

熱環境調査は、高知県南国市に位置する石土池（面積:25ha）を対象として、シンチロメータ、総合気象観測施設を用いて、2003年9月2日19:00から9月3日17:00にかけて石土池を構成する水生植物ごとのクールアイランド効果の検証（表面温度、気温、水温の計測）及び植生が被覆している地域と植生のない水面の蒸散効果の比較検証を行った。図5.2-3に調査の概念図を、表5.2-2に地点別の測定項目を示す。

表 5.2-2 熱環境観測項目

観測点	気温	湿度	風向 風速	地表面 温度	日射	長波 放射	水温	地温	シンチレ ーション
計測機器									
沿道 (芝)	○	○	○		○	○		○	
ホテイアオイ	○	○		○			○		○
ヒシ・ガガブタ	○	○		○			○		
ハス				○					
植生のない水面	○	○		○			○		

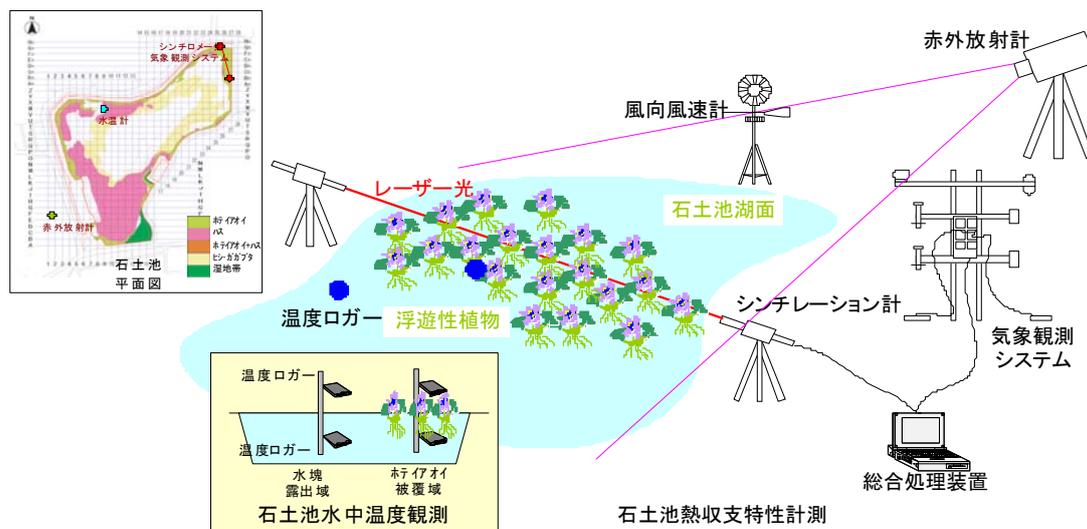


図 5.2-3 熱環境調査の概要

熱環境調査は、Scintec社の総合気象観測システムにより、芝地面の気温、湿度、全天日射量、上向き・下向きの長波放射量、地中熱流量を計測した。同時に、Scintec社のシンチロメータ(SLS-40)を用いて、石土池に浮遊しているホテイアオイの顕熱フラックスを24時間継続的に計測した。シンチロメータは、レーザー光の揺らぎの程度を総合処理装置により分析し顕熱フラックスを算出する手法であり、神田ら(1997)は平面の熱収支情報取得に対しての有用性を示している⁶⁾。

また、熱収支式により各湖面被覆別の熱特性を推定するために、石土池全体が見渡せる小山に赤外線熱画像装置（日本電気三栄（株）製TH-5100）を設置し、湖面の表面温度を計測するとともに、ホテイアオイ、ヒシ・ガガブタで被覆された地域、植生のない水面3ヶ所を抽出し、湖面上30cmと水中の30cmにそれぞれ温度計を設置して、24時間表面温度、気温、水温、湿度を計測した。

5.2.3 都市内水域の熱環境の現状

5.2.3.1 地表面温度計測結果

多様な植生を持つ湖沼を対象として24時間の赤外放射温度計測を実施し、植生と水域の表面温度の違い及び植生ごとの差異について計測した。図5.2-4は、画像を目視判読し、当該土地被覆と考えられる地域を矩形で囲み、その地域の表面温度の平均値を図示したものである。

植生のない水面は、樹木や芝地等の緑地系土地被覆や水草と比較して、昼間で約4℃地表面温度が低いが、夜間は逆に、約1.5℃程度温度が高くなっている。この結果は、5.1節の多摩中央公園の非対流性の池を対象とした24時間の表面温度計測と同じ傾向であるが、その差は小さくなっていると同時に、日中に表面温度は常に30℃以下であり、夜間も25℃以下になる時間が多い。これは、池の容量が大きくなったことにより貯熱容量が増加し、水が温まりにくくなったことによる。また、水草の種類による違いを検討した場合、昼間における表面温度は陸生の芝とほぼ同じ傾向を有しており、おおよそホテイアオイ≫ハス≫ヒシ・ガガブタの順に表面温度が高くなっており、その差は最大1.5℃程度である。夜間では、ヒシ・ガガブタは水塊とほぼ同じ温度になっているのに対し、ホテイアオイとハスは芝と同じ傾向を保持している。

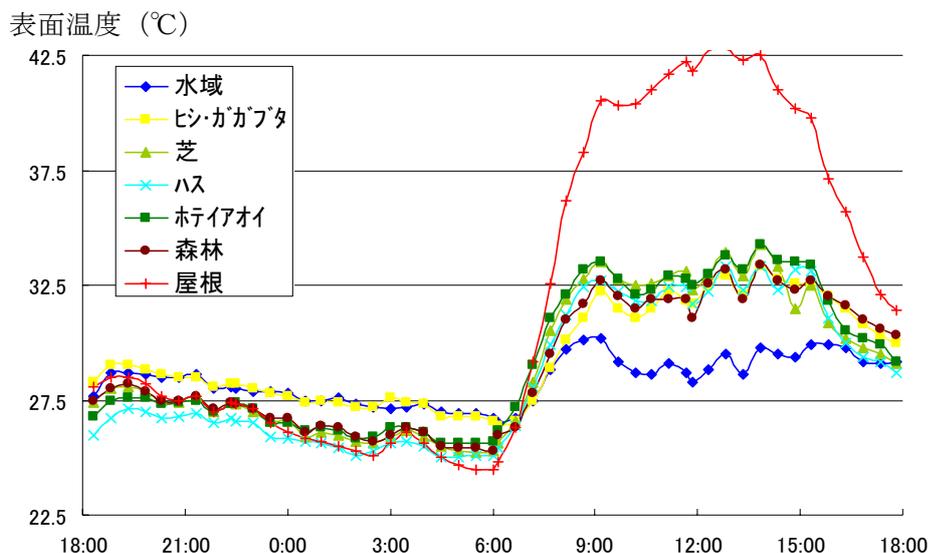


図 5.2-4 被覆別の地表面温度日変化

5.2.3.2 植生の有無による水温の変化

植生のない水面とホテイアオイ、沈水性植物が繁茂した水域の3地域について、湖面上30cmと直下の水中30cmにそれぞれ温度計を設置し、植生による水温の違いについて計測した。図5.2-5に、3地域の水中温度計測結果を示す。植生で被覆された水中温度は被覆されていない温度と比較して最大4℃低くなっている。また、夜間は、植生で被覆された水中

温度が逆転している。それは、植生が毛布となって、水中を暖めているからである。

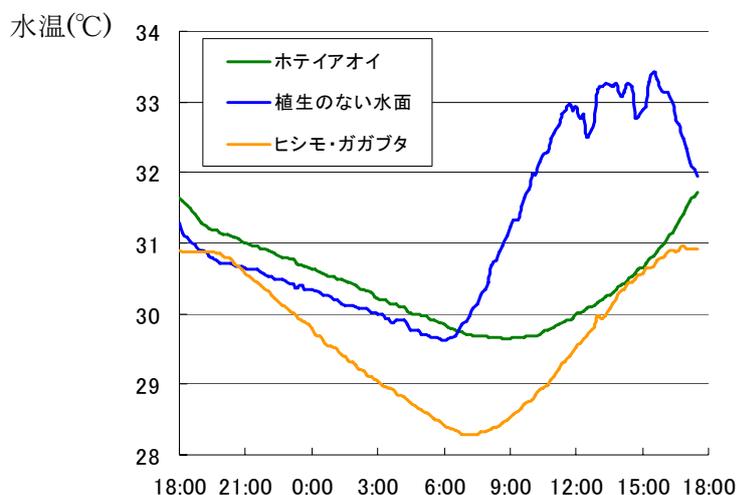


図 5.2-5 水草が湖面を覆うことによる影響

5.2.3.3 現地気象観測当日の各種気象状況

2003年は全国的に冷夏であったが、熱環境調査を実施した日は高知市で熱帯夜を記録するなど夏らしい気象状況となった。石土池の当日の気象状況は、9月2日はほぼ快晴であり、9月3日も15時までは快晴状態であった。15時以降は若干雲が発生したが、それでも長時間日射がかけられることはなかった。石土池の観測地点における最低気温は26.7°Cで最高気温が31.3°Cであり1日の平均気温は28.7°C、風速は9月2日は風速 $2\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$ 以下の微風、9月3日は $4\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$ 以下の微風であり、夜間は北風で日中は南風が卓越していた。また、全天日射量は12時時点で $816\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ を記録しており、かなり日射が強かった。

5.2.4 多様な植生を有する水面の熱環境特性

多様な植生を有する石土池におけるクールアイランド効果を検証する項目は、石土池の湖面を覆っているホテイアオイ、ヒシ・ガガブタ、ハス、植生のない水面の4項目であり、石土池を取り囲むように分布している芝道をこれらの比較対象として熱環境を計測した。

図5.2-6に、被覆別の熱収支計算結果を、表5.2-3に湖面被覆別の12時の時点の潜熱フラックス及び蒸散量算定結果を示す。なお、期間を通して顕熱フラックスは負の値をとっている場合、水体が熱源となっていることを示している。

植生のない水面の潜熱・顕熱フラックスは正味放射量と比較して非常に小さく、 G/R_n はほとんどの時間帯で0.8以上となっており、正味放射のほとんどが植生のない水面への貯熱量となっていることが示されている。これに対し、水草を含む水域の場合、正味放射に占める潜熱フラックスの割合は水塊のみと比較して2倍から3倍程度増加し、植物による蒸散効果が現れていることを示しているが、その効果は陸生の芝と比較して約1/2程度である。

次に、水草の種類別で比較してみると、潜熱フラックスのピーク値はホテイアオイ、ハスは約 $300\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ であるが、ヒシ・ガガブタは $200\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ であり他の水草と比較して小さくなっている。また、ヒシ・ガガブタの顕熱フラックスは水塊とほぼ同じ約 $0\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ となっているが、ホテイアオイとハスは $50\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ と若干高くなっている。これはヒシ・ガガブタの分布形状が水面に沿うような形で分布しており、葉面積が他の水草と比較して少なく、ホテイアオイとハスについては、葉面が暖められ、その熱エネルギーの一部が顕熱となって大気中に輸送され、少なからず大気温度の上昇を助けていることを示している。

一般に、緑地においては、蒸発散による潜熱フラックスの寄与によりクールアイランド効果を維持しているが、水域では正味放射の大部分が水体の貯熱量に使われ、顕熱フラックスへの寄与が少ないために低温が維持されているメカニズムを持っている。水草の熱環境特性は、水塊と比較して潜熱・顕熱フラックスが増加し、水塊への貯熱量が減少している。その効果は、水塊と芝の中間の特性を持った項目であるということができる。

表5.2-4は、石土池の現状と石土池が水界のみで構成されていた場合における夏季の12:00時点の顕熱・潜熱・地中熱流量の平均値を示したものである。

現在の熱環境特性は、石土池に植生がなく水域のみで構成されると仮定して試算した場合と比較して、池全体の平均潜熱フラックスは12:00の時点で $183.50\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ と約2倍増加している。顕熱フラックスはあまり変化していないことから、植生で被覆されることにより、これまで水塊への貯熱にまわされていた熱量が潜熱フラックスへと転化したと考えられる。この量は水界のみと比較して2倍であり、夏季の正午の時点ではあるが2倍のクールアイランド効果があることが示された。このように石土池の多様な植生は、都市のヒートアイランド効果が顕著に現れる夏季の都市気候をかなり緩和する効果があることが判明した。

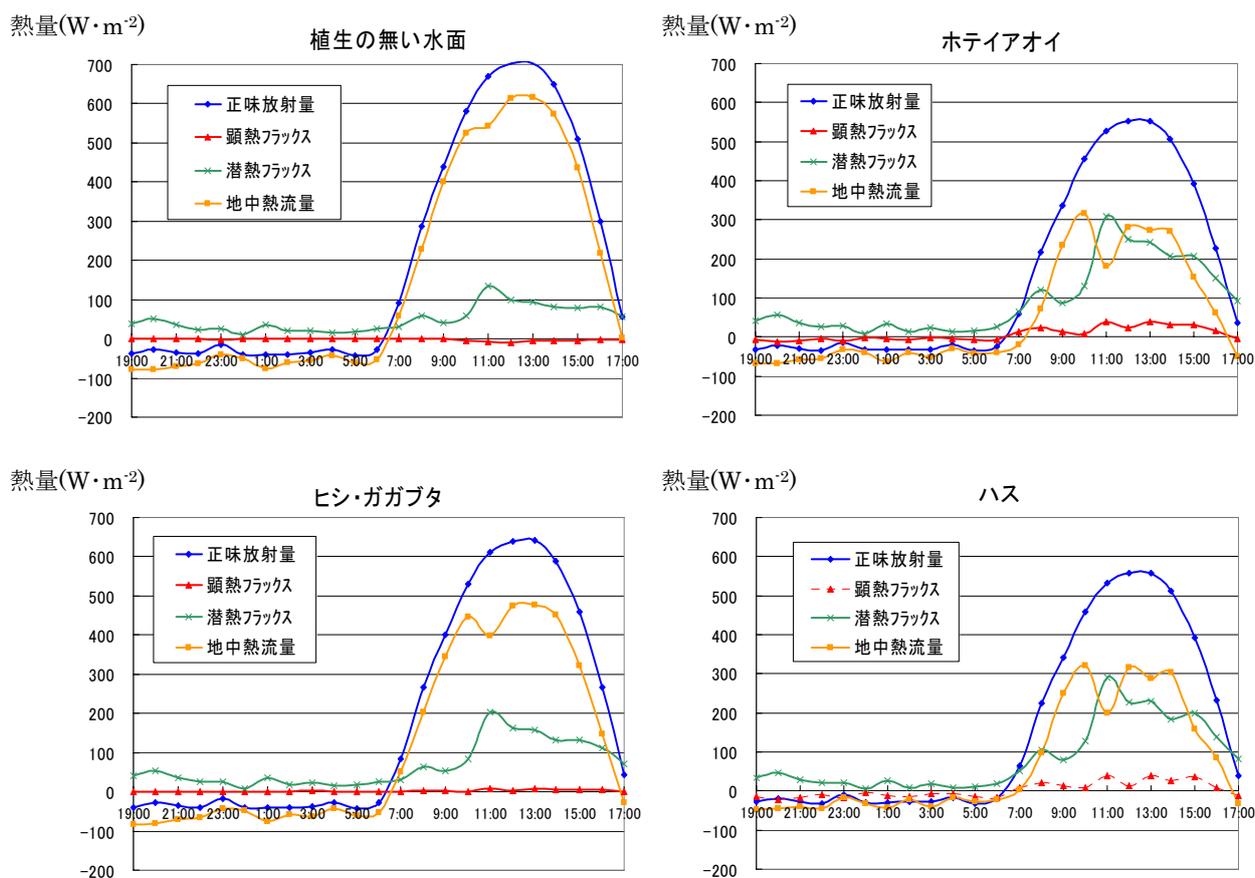


図 5.2-6 湖面被覆別熱収支計算結果（石土池、2003年9月3日）

表 5.2-3 湖面被覆別潜熱輸送量算定結果（石土池）

		ホテイアオイ	ヒシ ガガブタ	ハス	水面
12時	潜熱フラックス (Wm^{-2})	249.80	162.86	227.18	99.18
	蒸発散量(mmh^{-1})	0.36	0.23	0.33	0.14
日全体	蒸発散量(mm)	3.14	2.20	2.83	1.63

表 5.2-4 石土池の植生の有無による潜熱・顕熱・地中熱流量の比較（単位： $W\cdot m^{-2}$ ）

現状の石土池の植生	平均潜熱フラックス	183.50
	平均顕熱フラックス	7.13
	平均地中熱流量	428.23
石土池が水界のみで構成されていた場合	平均潜熱フラックス	99.18
	平均顕熱フラックス	-10.80
	平均地中熱流量	613.27

5.3 観測結果と既往観測結果との比較

一般に、蒸散量は、樹種や樹齢、樹木量だけでなく、地形や気象、土壌水分等に特に大きく影響されるため、本論で算出された結果の妥当性の検証は困難である。そこで、都市緑地を構成する樹林地、芝地、水面のクールアイランド効果の算出結果については、既往の文献により得られた調査結果と比較することにより有効性を検討した。なお、比較に当たっては、季節の影響を少なくするため夏季（7月～9月）の観測結果を収集するとともに、これらの観測結果は多摩中央公園と日射が異なるため単純に比較することはできない。そこで、正味放射に占める潜熱フラックスの割合（ $1E/R_n$ ）を計算することにより、日射の影響をなくすようにした。

樹林地

樹林地の蒸散量に関する既往研究としては2章で示すようにケヤキなどの落葉広葉樹を対象とした事例や、スギ・ヒノキなどの針葉樹を対象とした事例が多く、クスノキなどの常緑樹の計測事例は少ない。石津ら(1986)は、名古屋の夏季(8月28日)の快晴(最高気温 34°C 、湿度50%)の気象条件下におけるクスノキの蒸散量を測定した結果、日平均で $0.45\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ を推定している⁷⁾。この場合、名古屋の日照時間(13時間)を考慮して日蒸散量を推定すると、 $5.85\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$ に相当する。また、原菌ら(1988)は、1988年7月15日に滋賀県の希望が丘公園を対象にクスノキと同じ常緑樹であるヒサカキを対象に潜熱フラックスをバルク法にて推定を行い12時時点で $520\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (蒸散量: $0.75\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ に相当)と推定している⁸⁾。この時の正味放射量は $620\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ である。

本論での計測条件である最高気温 35.1°C 、相対湿度59%は、石津らによる計測事例とほぼ気象条件が同一であり比較することができる。これによると本論の算出結果は潜熱フラックスが $518.77\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (蒸散量: $5.28\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$ に相当)、そのときの正味放射量は $641\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ であり、石津らより10%程度低くなっている。これは樹齢や植栽方法、土壌水分などの生育条件の違いが考えられるが、オーダー的には大差ないと考える。また、原菌による調査結果を見てみると、潜熱フラックスの値が多摩中央公園とほぼ同じであり、 $1E/R_n$ も原菌らによる調査事例は0.839で多摩中央公園の0.808とほぼ同じ傾向を呈しており、正味放射エネルギーのほとんどが潜熱フラックスに使われていることを示している。

芝地

芝地に関する調査事例は、前述の原菌らによる滋賀県の公園に分布している芝地を対象に計測した事例は、12時時点の潜熱フラックスは $450\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (蒸散量: $0.65\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ に相当)、正味放射が $800\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ を得ている⁸⁾。また、筆者らは、高知工科大学の学内敷地を対象に2004年8月12日(最高気温 31.5°C)に熱環境調査を実施し、12時時点の潜熱フラックスが $517.9\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (蒸散量: $0.75\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ に相当)、正味放射量が $621.5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ と算定した⁹⁾。野島(2001)は、東京都千代田区麹町のビル屋上の芝地(コウライシバ)を対象に1997年9月2日(最高気

温 32.2°C) に熱環境調査を実施し、コウライシバの蒸散量として日平均 $0.19 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ を算定した¹⁰⁾。なお、この計測結果は1日あたり $2.28 \text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$ に相当する。

正味放射に占める潜熱フラックスの割合を見てみると、原菌らによる調査結果は 0.560、高知工科大は 0.832、多摩中央公園は 0.647 となった。高知工科大学の芝地は正味放射に占める潜熱フラックスの割合が高くなっているが、芝生の密度が高くなったため潜熱フラックスが増加した、土壌水分量の違いにより地中に入る熱量に差が生じたことの 2 点が原因として考えられる。このように、芝地の潜熱フラックスは、芝生の管理の程度により大きく変化が生じる特性を持っているが、本論で算出した芝地の潜熱フラックス(12時 $401.27 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、蒸発散量 $0.58 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、日総蒸発散量 $3.90 \text{ mm}\cdot\text{day}^{-1}$) は、既往の研究で示された値の範囲内にある。

水面

第2章で示すとおり、水面に関する熱環境の研究事例は少なく、植生で覆われた水面の研究事例はきわめて少ないのが現状である。

成田ら(2001)は、1999年8月19日に東京都隅田川を対象に河川水面を対象とした熱環境調査を実施し、10時の水面の潜熱フラックスは $90 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (蒸発量: $0.13 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ に相当)、正味放射量 $750 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ と算出している¹¹⁾。河川水などの水面はほとんど顕熱が発生せず、正味放射の大部分が河川水への蓄熱へと熱の移動が行なわれる。多摩中央公園の水面は、水深 50cm と浅くコンクリート・アスファルトで覆われた水面である。この浅い水面の潜熱フラックスは $230 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (蒸発量: $0.33 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$) の値が大きい原因としては、池への貯熱量は水が対流していないことから池の水を温めるのに使われるだけでなく、池の底面のコンクリート・アスファルトを暖めるエネルギーにも使われたものと考えられ、これにより池の水温が高い状態となり、蒸発量が多くなったものと考えられる。これに対し、石土池の植生の無い水面での潜熱フラックスは、12時時点で $99 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (蒸発量: $0.14 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ に相当)、正味放射 $701 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ であり、池の水が常に対流し池の底面が泥質又は砂泥質の場合、池の潜熱フラックスは一般的な河川とほぼ同じ傾向をとっている。

5.4 都市緑地のクールアイランド効果

本節では、東京都多摩市の多摩中央公園と高知県南国市の石土池を対象とした熱環境調査結果を取りまとめた。多摩中央公園と石土池の熱環境調査結果より、都市緑地を構成する緑地と水面のクールアイランド特性は下記に示す特性を有している。

緑地の熱環境特性

- 多摩中央公園のケースでは、被覆別のクールアイランド効果がもっとも顕著に出る南中時（12:00）の潜熱フラックスは、樹林地が最も大きな値を示し、12時に $518.77\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ であった。ついで芝地が $401.27\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ であった。一方、浅い水面では、正味放射の大部分（約65%）が水温を上昇させるための貯熱量に費やされるために、日中の蒸発に使われるエネルギー（潜熱フラックス）は緑地と比較して非常に小さく、 $230.47\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ （12時）にすぎなかった。

水面の熱環境特性

- 多摩中央公園に位置する水深が浅く底面と側面をコンクリートで囲まれた水面の表面温度は、昼間で 30°C を超え夜間でも 25°C と温度の高い状態が明け方まで継続している。これは、池の3面がコンクリートで構成されているため、昼間の貯熱量が底面のコンクリートを暖める熱量にも使われ、夜間にコンクリートから水塊へと熱が移動することにより、水温が高い傾向が明け方にかけても解消されないことが原因となっている。
- 石土池のケースにおける南中時の潜熱フラックスは、植生（ハス、ホテイアオイ、ヒシ・ガガブタ）で被覆された水面で $300\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、植生のない水面で $100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ であり、水面に水草が繁茂することによりクールアイランド効果は増加している。
- 本論における熱環境調査は、夏季の1日の観測結果から導き出されたものである。このため、水体への蓄熱量は水草が繁茂した地域で日平均 $50\sim 100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、植生のない地域で $150\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ と計測された。一般に、年単位で熱収支を見てみると水体への貯熱量はほとんど0である。水域での熱環境調査（2003年9月3日）周辺の気象状況を見てみると、観測日4日前の8月29日には日雨量 0.5mm で曇天であり、この状態が8月30日まで継続している。このことから、夏季における水体への蓄熱量は、気温の高い晴れの日には日トータルで0にはならずプラスの値を持ち水温は上昇するが、曇天や雨天のときに水面からの上向きの赤外放射量が卓越し、水温を下げていることが考えられる。
- 算出された潜熱フラックスは、既往の類似の観測事例から算出された結果の範囲内にあり、少なくとも相対的な差異を議論するプロセスではオーダー的には妥当なレベルにある。

第6章 都市緑地のクールアイランド効果の予測

森林が周辺の熱環境に与える影響は、絶えず変化しており一様ではない。これは、樹木が永久不変なものではなく、成長や枯損によって更新され続けているからである。よって、都市緑地のクールアイランド効果の予測を行う場合、熱収支モデルのほかに樹木の生長モデルを組み合わせたクールアイランド効果予測モデルの使用が不可欠である。そこで、本章では多摩中央公園を対象地として、樹木1本が識別できる航空機MSS画像と航空機MSSの撮影時間と同期させて実施した熱環境調査結果を用いてクールアイランド効果予測モデルを構築した。

なお、クールアイランド効果予測モデルの構築に当たっては、後述するように樹木の毎木調査データの精度の問題やモデル構築に用いた樹木の本数が限られたことなどにより得られた結果の精度に若干の問題があると予想される。よって、本論中の位置づけとしては、方法論の提示のみにとどめ、本モデルの具体的な検証は今後の課題とした。

6.1 都市緑地のクールアイランド効果の将来予測手順

樹木の生長を考慮したクールアイランド効果予測モデルの構築手順は、はじめに、①樹木の胸高直径と樹齢の毎木調査結果を用いてクスノキの樹齢と胸高直径との関係をモデル化する。次に、②航空機MSSで計測したクスノキのNDVIと対象木の胸高直径との関係を調査し、クスノキの胸高直径とNDVIの関係モデルを構築する。さらに、③胸高直径の異なるクスノキを3本選定し、クスノキのNDVIと潜熱フラックスとの関係より、NDVIをパラメータとした潜熱フラックス算定式を検討する。最後に、④クスノキの樹齢と胸高直径との関係、胸高直径とNDVIの関係モデル、NDVIをパラメータとした潜熱フラックス算定式より、NDVIを入力パラメータとする樹木の生長を考慮したクールアイランド効果予測モデルを構築する（図6.1-1）。

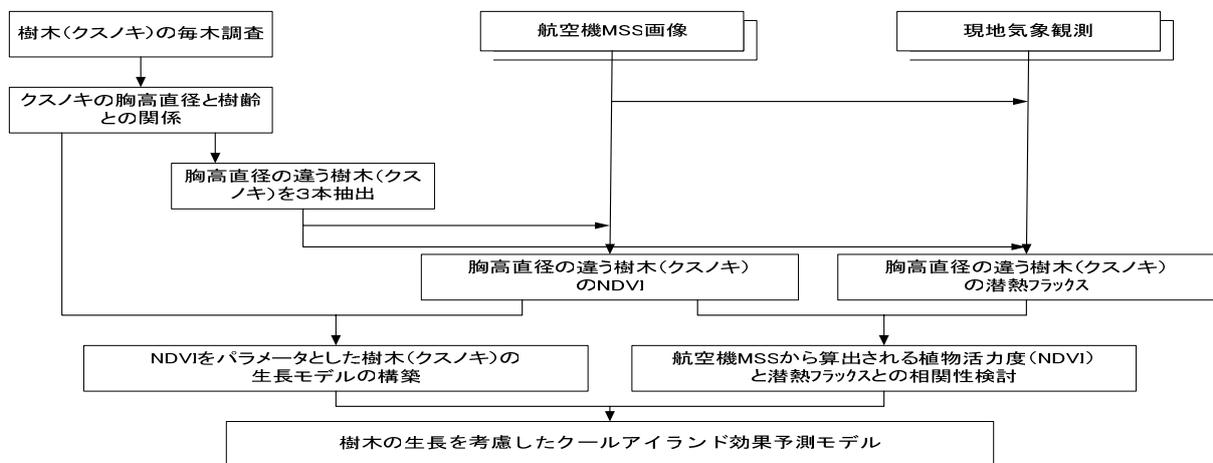


図 6.1-1 樹木の生長を考慮したクールアイランド効果予測モデル検討手順

6.2 樹木の生長を考慮したクールアイランド効果予測モデルの検討

6.2.1 既往調査からの樹木（クスノキ）の樹齢と胸高直径との関連調査

樹木の生長モデルは立木の効果的な収穫法や森林の保全計画を研究する目的で始められ、今後の生長予想や収穫量の予測モデルの研究が行われてきた。樹高及び胸高直径の生長モデルを見てみると、樹高及び胸高直径とも若齢林では生長速度は急で、高齢林に向かうほど生長速度は少なくなる性質を持っている。その関係は式(6-1)で示される Mitscherlich の法則に従っている¹⁾。

$$\bar{x}(t) = M(1 - e^{-kt}) \quad \dots \quad (6-1)$$

ここで、
 \bar{x} : 林齢 t 年の時の胸高直径
 M : 最大胸高直径
 k : 勾配係数
 t : 林齢 (年)

ここで、 $x(t)$ は樹齢 t 年の時の胸高直径(cm)、M は最大胸高直径(cm)、k は勾配係数、t は樹齢 (年) を表す。本論では、クスノキの生長モデルを胸高直径を基準として樹齢を算定するモデルを検討した。なお、クスノキの生長モデルの構築にあたっては、本来であれば多摩中央公園を対象とした毎木調査により多摩中央公園の地理的特性に相当した胸高直径と樹齢の関係をモデル化すべきである。対象木の樹齢を計測する際は、コアサンプルを採取し年輪の個数を計測する手法が一般的であるが、都市緑地の管理の都合上実施できなかった。そこで、本論では、(財)日本緑化センターが九州南部のクスノキ試験林で実施した毎木調査結果より集計した胸高直径と樹齢の関係²⁾を抽出し、九州南部のクスノキの生長量と東京のクスノキの生長量が同一と仮定して、胸高直径より樹齢を推定する式を検討した。表 6.2-1 に、(財)日本緑化センターが計測したクスノキの胸高直径と樹齢の関係を示す。

表 6.2-1 クスノキの胸高直径と樹齢の関係²⁾

樹齢 (年)	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	年輪幅 (cm)
5		0.97	0.00
10		3.30	0.00
15		5.67	0.00
20	16.0	7.65	4.85
25	21.0	9.80	6.36
30	26.0	11.90	7.88
35	31.0	13.60	9.39
40	35.5	14.40	10.76
45	40.4	15.35	12.24
50	55.9	16.00	16.94

表 6.2-1 より樹齢と胸高直径との関係を一次式で回帰した場合、式(6-2)が得られる。

$$t = 0.7917 \times x + 9.405 \quad \dots \quad (6-2)$$

なお、本関係式の適用限界は、16.0cm < 胸高直径(x) < 55.9cm であり、これを樹齢に換算すると、22 < t (年) < 54 である。

ここで、t は、林齢 (年)、x は胸高直径 (cm) であり、相関係数(r)は 0.970 である。クスノキの胸高直径を計測することにより概略的に樹齢を推定することができる。

6.2.2 航空機 MSS データを用いた NDVI をパラメータとした樹木 (クスノキ) の生長モデルの構築

一般に都市レベルの地表面観測には、地上分解能が 30m の LandsatTM が用いられ、農業分野や資源探査分野、森林分野など多岐にわたり適用され効果をあげている。しかし、リモートセンシング技術の樹木レベルの解析に際しては、樹冠幅が LandsatTM の 1 画素よりも小さいため、より地上分解能の細かいデータが必要になる。そこで、本論では、航空機 MSS により、地表面データの取得を行った。

6.2.2.1 航空機 MSS 観測概要

(1) 観測目的

多摩ニュータウン内の公園や街路に植栽されている樹木を、高解像度を有する航空機リモートセンシング技術により観測し、大規模緑地・都市公園を構成している樹木の質 (樹種) ・量 (本数) の組み合わせが周辺の大気熱環境に与える影響を時系列的に評価するための基礎データを得るものである。

(2) 観測概要

観測実施日 : 1995 年 8 月 16 日
 データ取得時間 : 第 1 サイクル 9:58~10:08
 第 2 サイクル 12:09~12:20
 使用センサー : AT-5M
 Band1:0.40~0.46 μm
 Band2:0.53~0.57 μm
 Band3:0.65~0.70 μm
 Band4:0.95~1.10 μm
 Band5:8.00~14.0 μm
 地上分解能 (予想値) : 1.2m

(3) 観測方法

航空機に MSS (Multi Spectral Scanner) を搭載し、多摩ニュータウン周辺を対地高度約

760m で、

コース1：東京農工大学波丘地試験場（東京都八王子市）と多摩ニュータウン永山南斜面（町田市真光寺町）を結ぶルート

コース2：多摩ニュータウン諏訪東斜面（稲城市坂浜）と東京都立大校舎（東京都八王子市南大沢）を結ぶルート

の2コースに分けて観測した。

(4) 観測データの後処理

航空機より撮影したデータには、通常の航空写真と同じ様な円形ひずみ（画像の中央部と端部とでは撮影精度が異なる）に代表される機械的な誤差と、観測時における水蒸気、エアロゾルの違いによる気象的な誤差が含まれている。そこで、時系列解析を行う上で各観測画像を同一の条件下で比較できるように、機械的な誤差補正をタンジェント補正で、気象的な誤差を大気補正で行った。

6.2.2.2 NDVI をパラメータとしたクスノキの生長モデルの構築

植物観測の分野では、主として農作物の収穫予測を行うことを目的として、植物の生育状況を示す指標の研究が進められてきた。この際、広範囲な地域を均一に計測する手法として人工衛星データを利用することが注目を浴びている。一般的に、植物は健全であれば緑の波長を持ち、可視域の赤色光域で小さく近赤外域で強い反射を示すが、葉の活性が落ちた場合には赤色光の反射が強く、近赤外での反射が小さくなる。また、農作物が十分に生育して地表を作物が覆うと、土壌からの反射による赤色光分が減り、作物からの近赤外成分が増加する。よって、このような性質から、近赤外と赤色のセンサを用いた NDVI 算出式が提案されている。

本項では、多摩中央公園及びその周辺道路に植栽しているクスノキの胸高直径を計測し、胸高直径とそのクスノキに対応する航空機 MSS から算出した NDVI との関連を調査した。なお、本論文で使用する NDVI 算定式は式(6-3)を適用した。

$$NDVI = \frac{Band4 - Band3}{Band4 + Band3} \quad \dots \quad (6-3)$$

ここで、 NDVI : 正規化植生指標（無次元）

Band_i : 航空機 MSS のバンド（輝度値）

なお、地上分解能 1.2m の精度になると、一般的なクスノキの樹冠幅よりも航空機 MSS の地上分解能の方が細くなり、一本の樹木の樹冠が複数ピクセルで構成されることになる。そこで、当該樹木の NDVI として、樹木が分布していると考えられる複数ピクセルのうちも

つとも NDVI が高いピクセルとした。図 6.2-1 に多摩中央公園周辺に分布しているクスノキの胸高直径と航空機 MSS から算出した NDVI との関係図を示す。

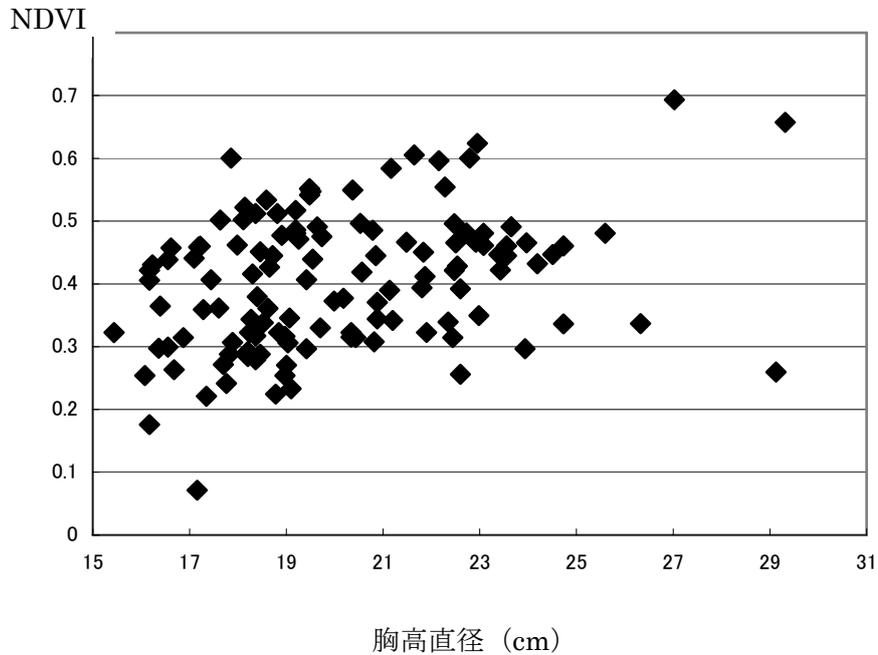


図 6.2-1 クスノキの胸高直径と NDVI との関係

図 6.2-1 を Mitscherlich の生長則で回帰すると、式(6-4)が得られる。

$$NDVI = 0.159 + 0.641 \times (1.0 - \exp(-0.042x + 0.032)) \dots (6-4)$$

但し、相関係数(r)は 0.52 である。さらに、式(6-2)と式(6-4)を組み合わせると、クスノキの樹齢と NDVI の関係が式(6-5)のとおり導き出される。

$$NDVI = 0.159 + 0.641 \times (1.0 - \exp(-0.053 \times (t - 10))) \dots (6-5)$$

一般に、都市緑地に植栽される樹木は、単木が多く、剪定や落葉・剪定枝条の収集などの管理が定期的に行われる。この際の剪定は、都市緑地を利用する人の邪魔にならないように手入れする方法がとられ、比較的幹の下部まで枝条がついていることが多い。また、樹木が生育している場所により、地盤や土壌、日射の状況が異なるため、生育量に差が生じやすい特徴を有する。これに対し、試験林は樹木間が競合しつつ上部へと生長するため、樹冠部およびその周辺に集中して枝条が分布している場合が多い。このため、都市緑地の樹木は試験林と比較して、全体的な葉量は多く、胸高直径の大きい特性を有するとともに、

生長量が同じ樹齢でも異なることが考えられる。このため、九州南部のクスノキ試験林を対象に樹齢と胸高直径をモデル化した本論の結果は、同じ樹齢でも NDVI に幅が生じ、樹齢が多めに予測された結果になっている点に留意する必要がある。

6.2.3 樹木（クスノキ）の NDVI と潜熱フラックスとの相関性検討

1995年8月16日に実施した現地気象観測データ（樹冠部における気温データ及び航空機 MSS 画像の熱バンド）から、クスノキの樹冠部における潜熱フラックスの算定を行い、航空機 MSS の NDVI と比較することで潜熱フラックス予測モデルを検討した。現地気象観測時における樹冠上部の気象データ取得状況は以下のとおりである。

- ・観測項目：気温、相対湿度
- ・データ取得時間：1995年8月16日 10時～12時
- ・データ取得頻度：5分間隔
- ・観測対象クスノキ：胸高直径 16cm、20cm、並木（25cm）
- ・気象観測機器設置場所：クスノキの樹冠上部約 50cm 地点

顕熱・潜熱フラックスは、樹冠部における正味放射量に対して林内もしくは樹冠内部への熱伝達（林内貯熱量）と大気を暖めるための顕熱フラックス、蒸発のための潜熱フラックスで収支がとれていると仮定して算定を行った。表 6.2-2 に調査したクスノキの潜熱フラックス計測結果を示す。

表 6.2-2 潜熱フラックス計測結果（クスノキ、1995年8月16日）

樹木	胸高直径 (cm)	潜熱フラックス(Wm^{-2})	
		10時	12時
クスノキ (単木)	16	387	401
クスノキ (単木)	20	308	487
クスノキ (並木)	25	407	526

クスノキの NDVI に対応した潜熱フラックスの分布を図 6.2-2 に示す。

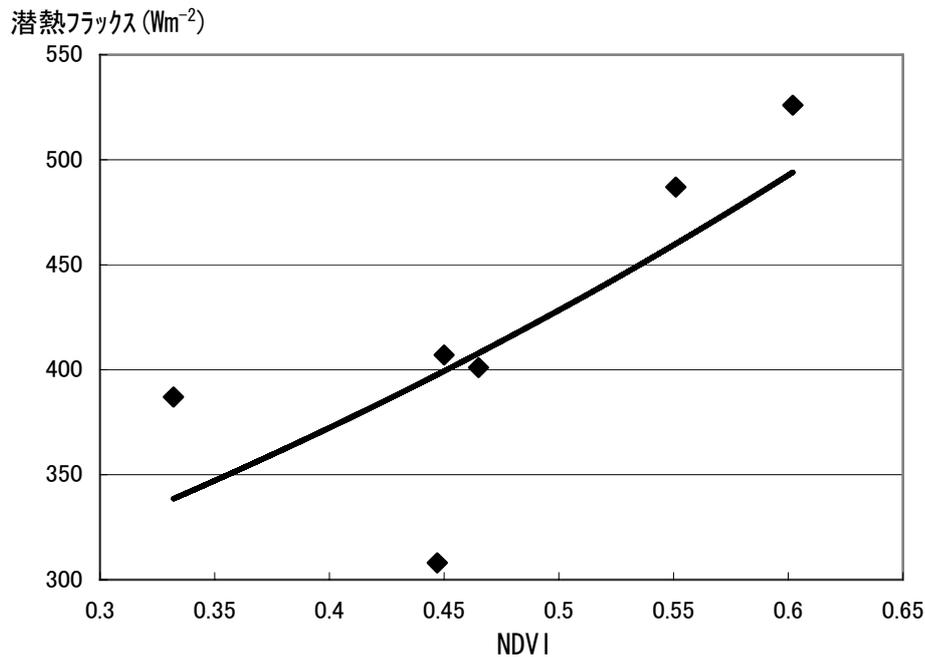


図 6.2-2 NDVI と潜熱フラックスの関係（クスノキ、1995 年 8 月 16 日）

クスノキの NDVI と潜熱フラックスの関係を指数関係で回帰した場合、以下の式で回帰できる。

$$\ell E = 212.67 \times e^{1.4002x} \quad \dots \quad (6-6)$$

ここで、 ℓE は潜熱フラックス ($W \cdot m^{-2}$) であり、相関係数 (r) は 0.647 である。式 (6-2), (6-5), (6-6) から、対象樹木の胸高直径を計測することにより、対象樹木の潜熱フラックスの将来予測が可能となる。なお、樹木の生長を考慮したクールアイランド効果の予測式は、前述のとおり樹木の毎木データの精度により、本モデルの樹齢の適用限界は $22 < t$ (年) < 54 である。

6.3 土地被覆の違いによるクールアイランド効果の特徴

クールアイランド効果予測モデルを用いて、代表的なクールアイランド項目である浅い水面、芝地、樹林地の 3 項目について、12 時の潜熱フラックスの現状及び 20 年後の状況を 1995 年 8 月に観測された多摩中央公園における熱環境調査結果より推定した。推定法は、浅い水面と芝地については 1995 年 8 月の観測結果が今後 20 年間継続すると仮定して算出した。また、樹林地のクールアイランド効果の推定に当たっては、多摩中央公園のクスノキ（樹齢 29 年）と設定し、樹齢 29 年から 49 年までの潜熱フラックスの変化をクールアイランド効果予測モデルに従って推定した。

表 6.3-1 に、土地被覆別のクールアイランド効果及び 20 年後の予測結果を示す。

表 6.3-1 土地被覆別の 12 時の潜熱フラックスの現状及び将来予測（20 年後）

	潜熱フラックス (Wm^{-2})		浅い水面を1とした場合の 20年後の潜熱フラックス の比率
	現状	20年後	
浅い水面	230	230	1
芝地	401	401	1.5
樹林地 (樹齢29年の場合)	469	582	2.6

その結果、現状の潜熱フラックスの土地被覆別の比率を見てみると、浅い水面を 1 とした場合、芝地 1.5、樹林地は 2.0 であった。20 年後樹木が生長することにより、潜熱フラックスは 24%増加し、その量は浅い水面を 1 とした場合、2.6 と向上するものと予測される。このことから、ヒートアイランド緩和の目的で都市緑地を設置する場合、20 年後に樹林地と同じクールアイランド効果を求めようとするならば、樹林地面積の 1.5 倍の芝地面積、2.6 倍の水域面積が必要となる。

第7章 クールアイランド効果の環境経済性

地球上では環境破壊に伴う地球温暖化が深刻になってきている。1997年3月に地球温暖化防止京都会議が開催され、先進各国では温室効果ガス（GHG）排出削減の数値目標を提示し、世界各国でGHG削減対策を進めている。

GHG排出対策の中で炭素税に代表される経済的手法は、市場メカニズムを通じて、各主体が合理的に取り組みを選択することにより、社会全体として最も効率的に排出削減を行う利点を有している。炭素税とは、地球温暖化の要因となっている二酸化炭素の排出削減を目指して、ガソリンや重油、石炭などの使用量に応じて課税される税金のことで、1990年以降、フィンランドやオランダ、ノルウェー、スウェーデン、デンマークなどですでに導入されている。我が国は、2004年時点では炭素税の導入は行われていないが、目標達成が困難になった現在、炭素税導入は政府の政策検討課題に登っている。炭素税が我が国に導入された場合、日本経済にさまざまな影響が出ることは容易に予見されるが、その影響度を予測する場合、熱環境緩和源であるクールアイランド効果の大きさやその経済的なポテンシャルを明確にする必要がある。しかし、2.2節で示したように、樹木のクールアイランド効果の環境経済性評価は未だ研究段階にあり、確立された手法は存在しない。そこで、本章は、水が蒸発する際に奪われる気化熱の大きさを他の環境財で代替する代替法にて、クールアイランド効果の環境経済評価の方向性を提示した。なお、クールアイランド効果の環境経済性評価は、石土池を対象とした2003年9月3日の熱環境調査結果を基準に算定した。

7.1 クールアイランド効果による環境経済性の推定手順

一般に、植生域や水域では日中において潜熱フラックスが卓越し、蒸散が盛んに行われる。この時、水が蒸発する際に奪われる気化熱（潜熱）は、周辺の気温を低下させる効果を有している。本論におけるクールアイランド効果の環境経済評価の要点は、この気温低下量に相当する潜熱フラックスが電力を利用することによって得られる熱量に代替させることにある。具体的な算定手順は、はじめに熱環境調査結果により得られた土地被覆ごとの潜熱フラックスに相当する電力量に換算する。次に、算定された電力量が現在の発電源から生成されたと仮定して、電力を生産する際に必要な炭素量を算定する。最後に、経済性を評価する視点として炭素税の概念を導入し、炭素量に乗じることで環境経済性を評価する（図7.1-1）。

なお、環境経済性評価推定にあたって用いたデータを以下に示す。

- ・ 環境経済評価の評価時点：2003年9月3日（熱環境調査日）
- ・ 評価使用クールアイランド効果：午前12時の時点の蒸散量（表7.1-1）

表 7.1-1 湖面被覆別の蒸発散量（2003年9月3日12時時点）

	ナイロイ	ヒメ	ハス	水塊	湿地	合計
蒸発散量 (mm/時)	0.26	0.14	0.18	0.24	0.47	0.20

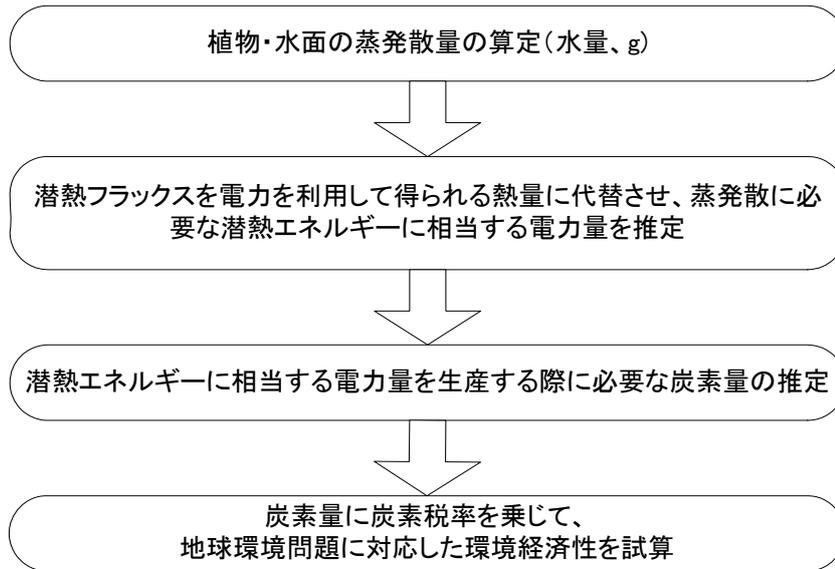


図 7.1-1 クールアイランド効果の環境経済性評価の推定法

7.2 クールアイランド効果による CO₂ 排出削減量の推定

(1) 水草のクールアイランド効果のエネルギー換算

植物等からの生成される水量が蒸発する際に必要なエネルギー（電気量）の推定方法は以下の算定式により算出する。

$$\text{Req_cooler} = \text{Per} / \text{Abi_cooler} \quad \dots \quad (7-1)$$

$$\text{Per} = \text{ET} * \text{Hv} / \text{Eh} \quad \dots \quad (7-2)$$

ここで、
 Req_cooler : 潜熱エネルギーのクーラー換算
 Per : 水草を含む水域の潜熱エネルギーの電力換算 (kWh)
 ET : 水草を含む水域の蒸発散量 (g・hr⁻¹)
 Hv : 水の気化熱 =583cal・g⁻¹ (constant)
 Eh : 1(kWh)あたりの電力を利用して得られる熱量 =860kcal (constant)
 Abi_cooler : 一般家庭用クーラーの冷房能力(2.5kW)

表 7.2-1 に、式(7-1), 式(7-2)により算出した水草を含む水域の潜熱エネルギーのエネルギー換算結果を示す。石土池の平均蒸散量は単位面積あたり 2.44mm・day⁻¹ であり、その水塊が気化する際に必要なエネルギーは約 39.2 万 kWh と計算された。このエネルギー量は、一般家庭用クーラー（8 畳用、2.5kW）、約 13,000 個分に相当するエネルギー量に相当する。

表 7.2-1 水草を含む水域の潜熱エネルギーのエネルギー換算結果

	葦イロイ	ヒシ	ハス	水塊	湿地	合計
蒸発散量 (mm/日)	3.14	2.20	2.83	1.63	5.67	2.44
蒸発散量 (kg/日)	81,381	124,483	231,016	109,342	32,230	578,453
電力換算結果 (kWh)	55,169	84,388	156,607	74,124	21,849	392,137

(2) 電力を生産する場合に必要な CO₂ 排出量の推定

現状の石土池の CO₂ 排出削減効果は、(1) で推定した石土池のクールアイランド効果のエネルギー換算結果と、現状のエネルギー使用量とエネルギー種別炭素排出量より算定した現状の CO₂ 排出実績値を乗じることにより予測した (式 7-3)。

$$\text{Ex_CO}_2 = \text{Unit_CO}_2 * \text{Per} \quad \dots \quad (7-3)$$

ここで、
 Ex_CO₂ : クールアイランド効果による CO₂ 排出削減ポテンシャル (t・hr⁻¹)
 Unit_CO₂ : 現在の発電割合に応じた単位 kWh あたりの CO₂ 排出量

$$=382.434\text{g}(\text{kWh})^{-1} \text{ (constant)}$$

Per : 水草を含む水域の蒸発散による一次エネルギー消費軽減ポテンシャル(kWh)

現在の発電割合に応じた単位 kWh あたりの CO₂ 排出量の推定にあたっては、発電実績による各種電源別の CO₂ 排出原単位に 2001 年の発電実績を乗じて算出した。表 7.2-2 に、各種電源別の CO₂ 排出原単位および 2001 年の発電実績を示す。表 7.2-2 より、2002 年の発電実績による CO₂ 排出原単位を推定すると、1KWh あたり 382.434g-CO₂ となる。

表 7.2-2 各種電源別の CO₂ 排出原単位および 2001 年の発電実績

電源	水力	石炭火力	石油火力	LNG火力	原子力	地熱その他
CO ₂ 排出原単位 (g-CO ₂ /KWh)	11	742	742	608	22	15
発電割合 % (2002年実績)	9.5	20.5	7.9	26.8	34.6	0.7

表 7.2-3 にエネルギー消費軽減による炭素排出削減ポテンシャルの推定結果を示す。表 7.2-3 より、多様な植生を持つ石土池の夏の 1 日当たり家庭用の空調機を想定した CO₂ 削減量は 149.97t-CO₂ と予測され、この蒸散効果が夏季連続(90 日)して続くと仮定して試算した夏季全体の CO₂ 軽減効果は、13,497t-CO₂ と予測される。現在、高知県では、地球温暖化対策地域推進計画を策定し、2010 年には 2000 年実績の 7.7%減である 1,055 万 t-CO₂ を目標としている。本論で試算した石土池が夏季に削減できる CO₂ 量は、高知県が目標 CO₂ 削減量の約 0.13%に相当する。

表 7.2-3 エネルギー消費軽減による炭素排出削減ポテンシャルの推定結果

	杉仔刈	ヒソ	ハス	水塊	湿地	合計
CO ₂ 排出量換算(t/日)	21.10	32.27	59.89	28.35	8.36	149.97

7.3 石土池のクールアイランド効果の環境経済性の評価

近年、地球温暖化の高まりとともに、発展途上国の資源を用いて先進国の経済的繁栄が成立するという考え方から、炭素税取引の概念が注目を浴びている。日本における炭素税の導入方法については、使用される燃料に対する従量税という形式で導入することが検討されている。中央環境審議会の目標達成シナリオ小委員会（西岡秀三委員長）によると、炭素1トンあたり約3万円の炭素税を導入すれば、2010年のCO₂など温室効果ガスの排出量を90年レベルから2%削減することが可能であり、この場合の国内総生産（GDP）の損失は0.06～0.72%に抑えられるなどとする中間取りまとめ案をまとめている¹⁾。このように炭素税導入は、企業経営にとって重要な判断指針になるだけでなく、今後の日本経済にとっても強い影響因子になる可能性を持っている。大規模都市内部の都市緑地を想定したクールアイランド効果の貨幣価値の推定にあたっては、地球環境の観点から炭素税の概念を取り入れ、CO₂排出期待量に炭素1tあたりの単価を乗じて算出した（式7-4,式7-5）。

$$Ex_C = Ex_CO_2 / 3.67 \quad \dots \quad (7-4)$$

$$C_Tax = Ex_C * Tax \quad \dots \quad (7-5)$$

Ex_C：炭素排出量(t・day⁻¹)

Ex_CO₂：CO₂排出削減量(t・day⁻¹)

C_Tax：炭素税換算（円・day⁻¹）

Ta：炭素1 tあたりの炭素税額 =30,000 円（中央環境審議会 地球環境部会試算）

表7.3-1に、石土池のクールアイランド効果の環境経済性評価結果を示す。

表 7.3-1 石土池のクールアイランド効果の環境経済性評価結果（2003年9月3日時点）

	杉イワイ	ヒシモ	ハス	水塊	湿地	合計
炭素税換算(万円/日)	17.26	26.40	49.00	23.19	6.84	122.70

石土池のクールアイランド効果による環境経済性は、最大ポテンシャルベースで122.7万円/日と試算され、その効果は、高知県における実質の県民総生産（平成13年度、日額：69.6億円）の約0.018%に相当する額である。

第8章 クールアイランド効果に配慮した都市緑地の整備計画立案

支援モデルの検討

本章では、前章までに得られた知見を応用して、クールアイランド効果を踏まえた総合的な都市緑地の整備計画を立案する際の支援モデルを提案する。

8.1 クールアイランドに配慮した都市緑地の整備計画の立案支援モデル

公共事業の実施に当たっては、検討段階での政策決定の過程や根拠、想定されるリスク、目標や成果など住民に必要な事項を説明することが求められる。このためには、設定した目標や目標を達成するための根拠、その政策が妥当かどうかの評価指標が必要である。このことから、近年、戦略目標に向けた施策案に対して、施策毎に施策を実施した場合の費用と、それに伴うコスト削減等の効果を貨幣価値に換算し評価を行う施策評価システムの研究が地方自治体の業務効率化の分野で検討され始めている。本システムの利点としては、施策目標が明確になる、施策ごとの効用とそれに必要なコストが把握しやすいなどが挙げられ、今後各方面への利活用が期待されている。本節では、都市緑地のクールアイランド効果と効果を得るために必要なコストを関数化し、クールアイランドの視点から都市緑地の施策立案支援モデルを検討した。

8.1.1 クールアイランドに配慮した都市緑地整備計画の策定手順

8.1.1.1 都市緑地整備計画におけるクールアイランド効果の位置づけ

クールアイランド効果に配慮した都市緑地整備計画の目的は、温熱的に快適な緑地と周囲の空間を創出するとともに、緑地の気候緩和効果を最大限に引き出して地域や都市全体の気候緩和を図り、ひいては室内居住空間の都市気候改善や省エネルギーを達成することにある。都市気候は、2章で述べたように都市緑地や水辺空間、森林、構造物などの規模や素材、配置、あるいは産業・運輸部門からの人工排熱などさまざまな要因が影響している。よって、都市の気候緩和を検討する場合、都市計画策定段階において都市気候に対する配慮を行い、その上で、個々の都市緑地整備にその思想を反映させていかなければならない。環境先進国であるドイツでは土壌、水質、大気、気候、生態系などのランドスケープの保全を目的としているランドスケープ計画が都市計画と平行して定められており、土地利用計画との一体化が義務付けられている。わが国における都市計画に対する都市気候上の配慮は、京都議定書発効による地球温暖化論議の高まりにより近年ようやく検討され始めた。

8.1.1.2 クールアイランドに配慮した都市緑地計画の策定手順

クールアイランドに配慮した都市緑地整備計画を行うにあたっては、はじめに目的を明らかにし、設定された目的に対してより具体的・数値的な目標を設定する。目標としては、

クールアイランド効果が効果的、効率的に機能する方策や、地域開発や建造物の建築前後での温熱的な快適性が変化しないようにすることが考えられる。いずれも、考えられる緑地整備計画についての効果と費用を算定し、限られた予算と時間の制限下での最適な方策を計画の中に位置づける。図8.1-1にクールアイランド効果に配慮した都市緑地整備計画の策定の流れを示す。本論で検討するモデルは、図8.1-1に示した都市緑地整備計画の策定手順の中で、都市気候の設定値と予測値との比較及び都市緑地の土地被覆パターンの選定を支援するためのツールと位置づける。

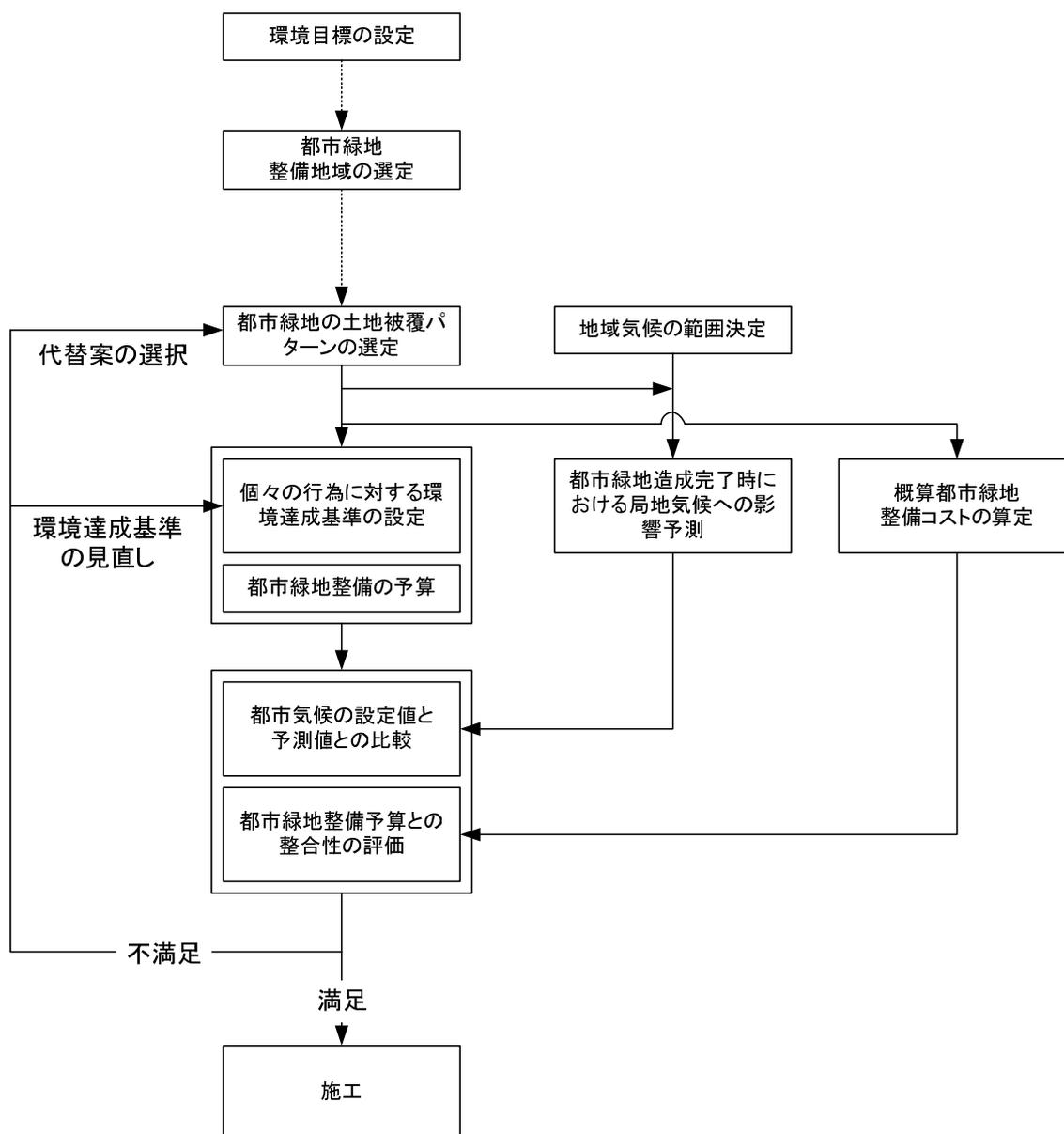


図8.1-1 クールアイランド効果に考慮した都市緑地計画の流れ

8.1.2 クールアイランド効果を機能させる都市緑地整備の環境目標の設定

都市緑地の整備における施策立案評価法を検討するに当たって、はじめに、都市緑地の戦略目標を定める必要がある。本論では、都市緑地の設置に当たっての戦略的な目標をロジックモデルを用いて検討した。平成17年度の環境省における重点施策を見てみると、持続可能な社会の構築を目標に、地球や都市の温暖化対策などを重点施策として位置づけており、大規模緑地を活用した熱環境改善構想を施策項目として提示している¹⁾。また、東京都は、「緑の東京計画」の中で、夏季における都市の高温化がヒートアイランドや地球温暖化を助長し東京都民の健康や経済活動を損ねているとして、夏季の最高気温を下げることをコンセプトとして屋上緑化の推進や都市緑地の再生を今後の重点施策と設定している²⁾。

都市緑地整備の環境目標を定めるに当たっては、政府や地方自治体の動向を踏まえ、「持続可能な社会の構築」と設定し、具体的な戦略目標は、「地域の平均気温を低下させる」と定義する。以下、「ヒートアイランド緩和の視点からの持続可能な社会の構築」を達成するための具体的な施策を論理的に図示したものを図8.1-2に整理する。

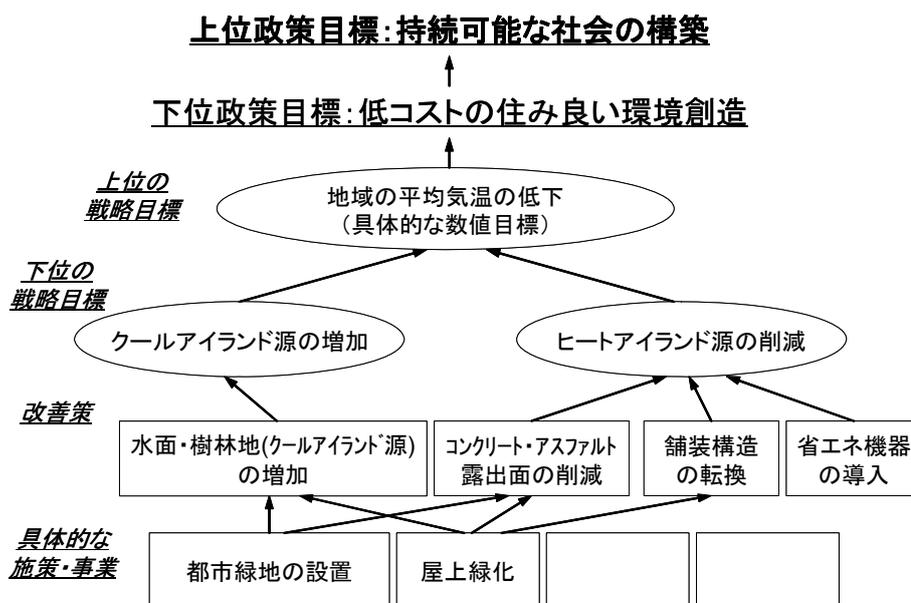


図 8.1-2 クールアイランド効果を機能させる都市緑地整備の環境目標

8.1.3 クールアイランド効果の視点からの都市緑地の整備計画の評価関数の設定

本項では、都市緑地を造成した場合のクールアイランド効果、造成コストを関数化し、都市緑地造成施策の評価関数を構築した。評価関数の設定に当たっては、クールアイランド源である芝地と樹林地、水面の3項目を指標とし、評価関数設定の根拠となる気象データは、1994年8月28日に実施した多摩中央公園を対象とした熱環境調査より引用した。

8.1.3.1 都市緑地のクールアイランド効果関数の設定

都市緑地のクールアイランド関数は、都市緑地を構成する各土地被覆の面積を指標として気温低下量（気温削減ポテンシャル）を推定するモデルである。

都市緑地の気温低減ポテンシャルは、都市緑地上空の空気塊が潜熱フラックスのみにより冷却されると仮定し、接地境界層より下の空気の気温低下量を算定した（図8.1-3）。なお、顕熱による気温上昇や移流の影響などほかの要因については本論では取り扱わない。ここで算出された気温低減ポテンシャルは、都市緑地との距離や風や湿度などの気象条件により効果に差が生じるが、都市緑地が持つ最大の気温低下量として位置づけることができる。気温低減ポテンシャルを算定するに当たっての前提条件を以下に示す。

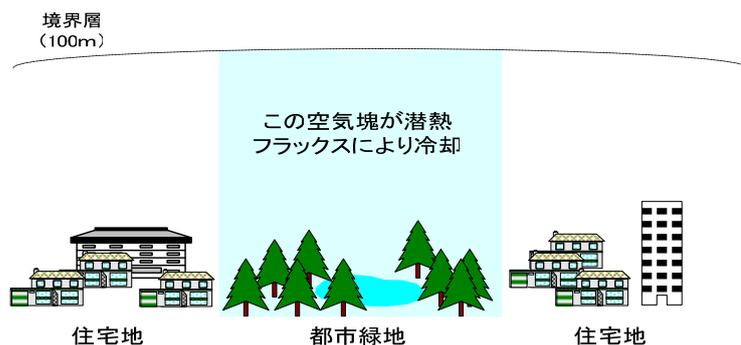


図 8.1-3 気温低減ポテンシャルの概念図

気温低減ポテンシャルを算出するに当たっての前提条件

- 気温低減ポテンシャルの境界条件：100m（接地境界層）
- 気温は潜熱フラックスのみにより影響すると仮定
- 気温低減ポテンシャルの評価時点は12時
- 樹林地は樹齢22年の樹木を植栽し、6章よりモデル構築の適用限界である樹齢54年には生長が停止すると仮定

気温低減ポテンシャルの算定基礎式を以下に示す。

$$T = \frac{AE}{Cp\rho \times A \times h} \dots \dots \dots (8-1)$$

$$AE = \frac{LE}{L} \times 60 \times 60 \quad \dots \dots \dots (8-2)$$

$$\rho = 1.293 \frac{273.15}{273.15 + T_s} \left(1 - 0.378 \frac{e}{1013.15} \right) \dots \dots \dots (8-3)$$

$$LE = 2.50 \times 10^6 - 2400T_s \quad \dots \dots \dots (8-4)$$

$$e = 6.1078 \times 10^{7.5T_s / (237.3 + T_s)} \quad \dots \dots \dots (8-5)$$

ここで、T：気温低下量（℃）：AE：蒸発潜熱（cal・day⁻¹）、Cp：空気の定圧比熱（気温 30℃の空気の定圧比熱 0.24 cal・g⁻¹）、ρ：空気の密度、A：検討対象面積（km²）、h：境界層の高さ（100m）、LE：潜熱フラックス（W・m⁻²）、L：水の気化の潜熱（cal・g⁻¹）、e：飽和水蒸気圧（hPa）、Ts：投入気温（℃）である。

なお、本論では、気温低減ポテンシャルの境界条件を接地境界層上端の 100m に設定している。理由としては、本論で使用している各種気象観測データは AMeDAS や現地気象観測結果に基づいているが、これらの情報は高さ 100m 以内に位置する接地境界層における気象情報である。そこで、萩島ら(1999)による大気シミュレーションモデル³⁾と同様に、大気の計算領域を 100m 固定として取り扱っている。気温低減ポテンシャルの算定手順を図 8.1-4 に示す。

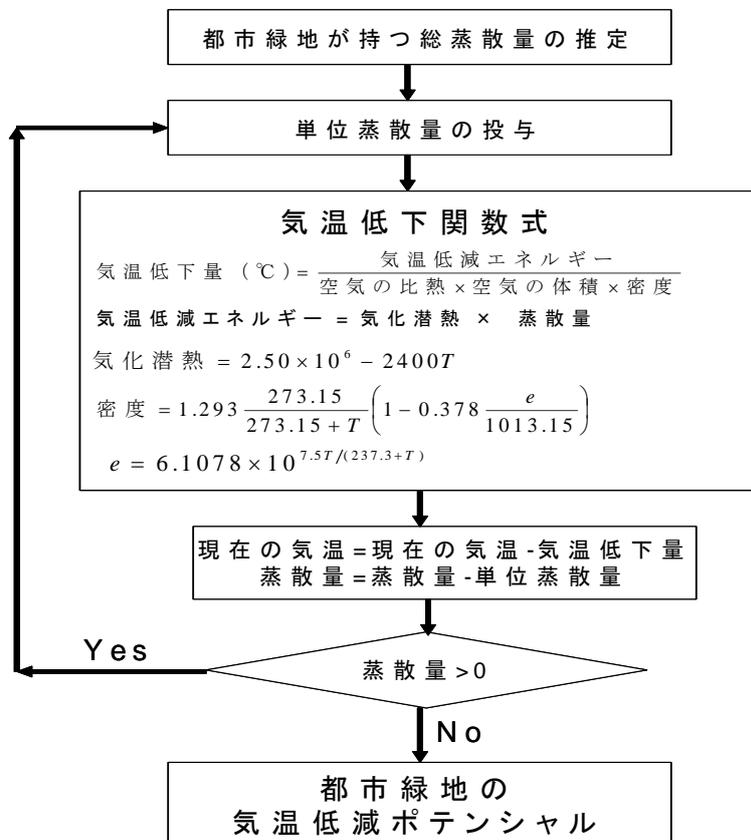


図 8.1-4 気温低減ポテンシャル算定手順

気温低減ポテンシャルの算定手順は、はじめに都市緑地が持つ総蒸散量を推定し、次に、の水が単位時間内に徐々に蒸散し気温を低下させると仮定し、単位蒸散量に対する気温低下量を推定する。これを総蒸散量が0になるまで連続させ、都市緑地の気温低下量を推定していく。

土地被覆別の12時の時点の潜熱フラックスは、表8.1-1のとおりである。樹林地については樹木の生長を考慮し、式(6-5)、(6-6)より算定した潜熱フラックスを適用する。

表 8.1-1 12時時点の土地被覆別の潜熱フラックスと蒸散量

土地被覆	潜熱フラックス (12時時点, $W \cdot m^{-2}$)
芝地	401
浅い水域	230

12時の時点の各土地被覆の潜熱フラックスより、単位面積当たりの気温低減ポテンシャルを式(8-1)～式(8-5)より算出した。表8.1-2に境界条件を100mとした場合の芝地と浅い水域の単位面積当たりの12時時点における緑地上空の気温低減ポテンシャル算定結果を、図8.1-5に樹木の植栽後の緑地上空の気温低減ポテンシャル推移図を示す

表 8.1-2 単位面積当たり気温低減ポテンシャル推定結果 (12時時点)

土地被覆	平均蒸散量 ($mm \cdot hr^{-1}$)	気化エネルギー ($cal \cdot hr^{-1}$)	t年後の緑地上空の 気温低減ポテンシャル ($^{\circ}C$)
芝地	0.58	$3.37E+11$	13.17
浅い水域	0.33	$1.93E+11$	6.61

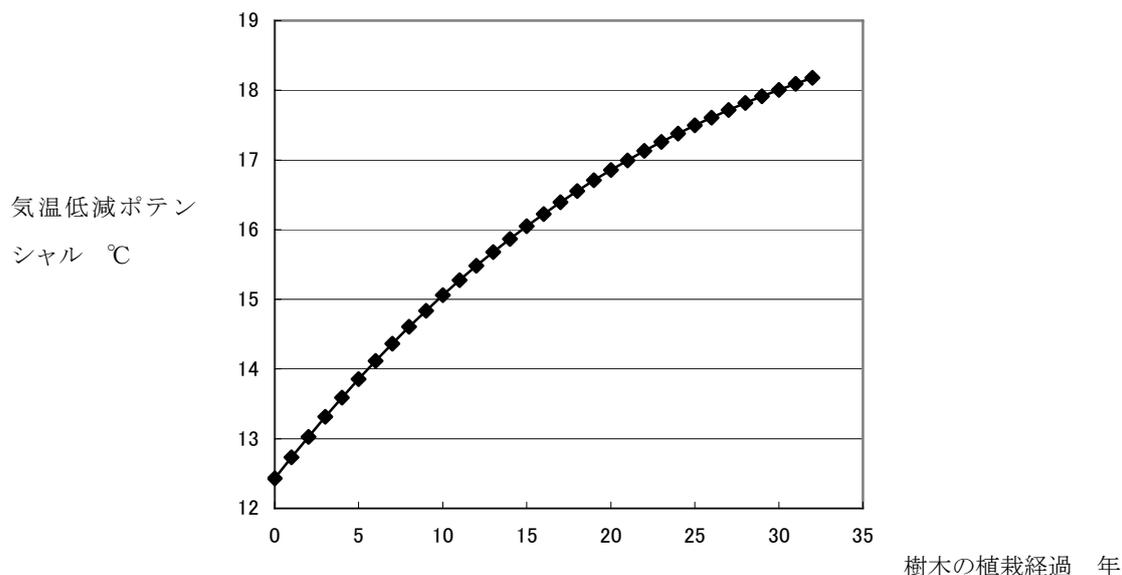


図 8.1-5 樹木の植栽後の緑地上空の気温低減ポテンシャル推移図

表 8.1-2 と図 8.1-5 は、単位面積当たりの気温低減ポテンシャルであるから、都市緑地を構成する各土地被覆面積を x_i 、整備後 t 年の都市緑地のクールアイランド効果関数式は、式(8-6)のとおり示される。

$$\text{Deg}(x_1, x_2, x_3, t) = \underbrace{13.17 \frac{x_1}{\sum x_i}}_{\text{芝地項}} + \underbrace{6.61 \frac{x_2}{\sum x_i}}_{\text{水域項}} + \underbrace{\text{Unit}_f \frac{x_3}{\sum x_i}}_{\text{樹林地項}} \dots \quad (8-6)$$

$\text{Deg}(x_1, x_2, x_3, t)$: クールアイランド効果 (気温低減ポテンシャル $^{\circ}\text{C}$)、 x_1 : 芝地面積、 x_2 : 浅い水面の面積、 x_3 : 樹林地面積、 Unit_f : 図 8.1-5 により得られる樹木の単位面積当たりの気温低減ポテンシャル ($^{\circ}\text{C}$) である。

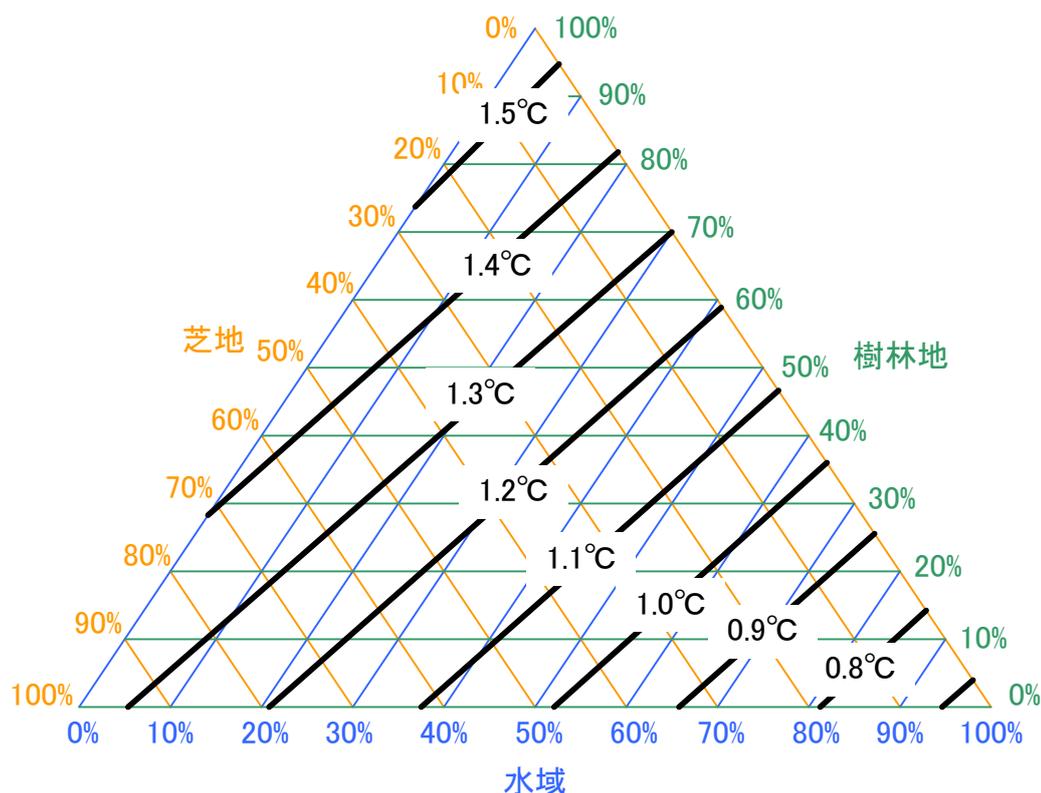


図 8.1-6 1km²の都市の中に10haの都市緑地を設置した場合の
気温低減ポテンシャル推定結果図 (造成後15年)

式(8-6)は、都市緑地上空の気温低減ポテンシャルを表している。気温低減ポテンシャルの算定法は、都市緑地から接地境界層までの空気塊の気化エネルギーを冷却される空気塊の量で除したものである。よって、冷却される空気塊を都市面積として式(8-6)を変形すると、芝地や樹林地の単位面積あたりの都市気温低減ポテンシャルを算出することができる。都市面積を $A(m^2)$ とし、各土地被覆を単位面積($1m^2$)増加させることによる気温低下量の増分関数 $T_{deg}(x_1, x_2, x_3, t, A)$ は式(8-7)であらわされる。

$$T_{deg}(x_1, x_2, x_3, t, A) = \frac{1}{A} \times \left[13.17 \frac{x_1}{\sum x_i} + 6.61 \frac{x_2}{\sum x_i} + Unit - f \frac{x_3}{\sum x_i} \right] \dots (8-7)$$

図 8.1-6 に、広さ $1km^2$ に $10ha$ の都市緑地を設置した場合の造成後 15 年の例とした樹林地と芝地、浅い水面の土地被覆面積率と気温低減ポテンシャルの関係図を示す。

なお、本関係式は、1994 年実施の熱環境調査をもとに気温低減ポテンシャルを推定している。計測機器の観測精度を考慮して気温の算出精度を計算すると $0.006^{\circ}C$ であることから、関係式による算出結果のうち、小数点 3 桁以下の議論は意味を持たない。

8.1.3.2 コスト関数の設定

各土地被覆の単位面積当たりの建設費の算定については、樹林地と芝地は建設工事標準歩掛（(財)建設物価調査会、平成 14 年 8 月）⁴⁾により植栽工に関する標準的な歩掛りと、月間積算資料（(財)経済調査会、平成 14 年 6 月）⁵⁾より、材料や人件費の標準単価を引用し、推定した。また、水域は、該当する工事の歩掛りが収集できなかったため、石土池の設置にかかる建設費より単位面積当たりのコストを推定した。表 8.1-3 に、樹林地と芝地に関連する植栽工の標準歩掛を、表 8.1-4 に材料費と人件費を示す。

表 8.1-3 樹林地と芝地に関連する植栽工の標準歩掛（平成 14 年 8 月調査）

樹林地				芝地			
周囲長15cm未満のクスノキの100本を植栽工にて設置した場合の歩掛				コウライシバを100m ² 植栽工にて設置した場合の歩掛			
大項目	項目	数量	単位	大項目	項目	数量	単位
人件費	世話役	3.2	人	人件費	世話役	0.2	人
	造園工	16.1	人		造園工	1.1	人
	普通作業員	9.6	人		普通作業員	2.3	人
直接費	クスノキ	100	本	直接費	コウライシバ	100	m ²
					目土	2.7	m ³
雑費		5%	労務費の5%	雑費		5%	労務費の5%

表 8.1-4 樹林地と芝地に関連する材料費、人件費（平成 14 年 6 月調査）

大項目	項目	数量	単位
材料費	クスノキ	5000	本/円
	コウライシバ	480	円/m ²
	目土	1000	円/3リットル
人件費	世話役	21100	円/日
	造園工	16100	円/日
	普通作業員	15700	円/日

公害健康被害補償予防協会(2003)によると、クスノキなどの高木を公園などに植栽工にて設置する場合、植栽密度は100m²あたり4本が最適であるとしている。そのことを考慮して、表 8.1-3 と表 8.1-4 の基礎データより樹林地と芝地の植栽工を実施した場合の単位面積当たりの設置コストを算定すると、樹林地 20,253 円・m⁻²、芝地が 10,089 円・m⁻²と計算された。次に、水域の単位面積当たりの設置コストであるが、高知県南国土木事務所にヒアリングを行ったところによると石土池は昭和 53 年に施工開始、昭和 60 年に施工が完了しておりその間の総事業費は 35.7 億円であるとの回答を得ている。水域の単位面積当たりの設置コストの算定に当たっては、石土池の総事業費から調整池面積を除する簡易な手法にて推定した。

$$\begin{aligned}
 \text{水域の単位面積当たりの設置コスト(円/m}^2\text{)} &= \text{総事業費(円)} / \text{調整池面積(m}^2\text{)} \\
 &= 35.7(\text{億円}) / 25(\text{ha}) \\
 &= 14,280 \text{ 円} \cdot \text{m}^{-2}
 \end{aligned}$$

上記の算定結果を整理すると、都市緑地の造成コストは、各土地被覆面積の関数として表現することができる。芝地面積を x_1 、水面面積を x_2 、樹林地面積を x_3 とした場合の都市緑地の造成コスト関数 (C) は式 (8-8) のとおり表現できる。

$$C(x_1, x_2, x_3) = 10089x_1 + 14280x_2 + 20253x_3 \quad \dots \dots \quad (8-8)$$

図 8.1-5 に、土地被覆面積率と単位面積当たりの造成コスト関数との関係図を示す。本論における水域の設置コストには誤差が多分に含まれていると考えられるが、設置事例を多数収集することにより精度が高くなると予想される。

8.2 都市緑地整備計画におけるクールアイランド効果を発揮させるための土地被覆の組み合わせ

8.1.3で導出した便益関数とコスト関数より、クールアイランド効果を効率的に機能させるための都市緑地の整備法について検討した。図8.2-1に環境質3種類と造成コストを満足する都市緑地の被覆組み合わせの検討概念図を示す。

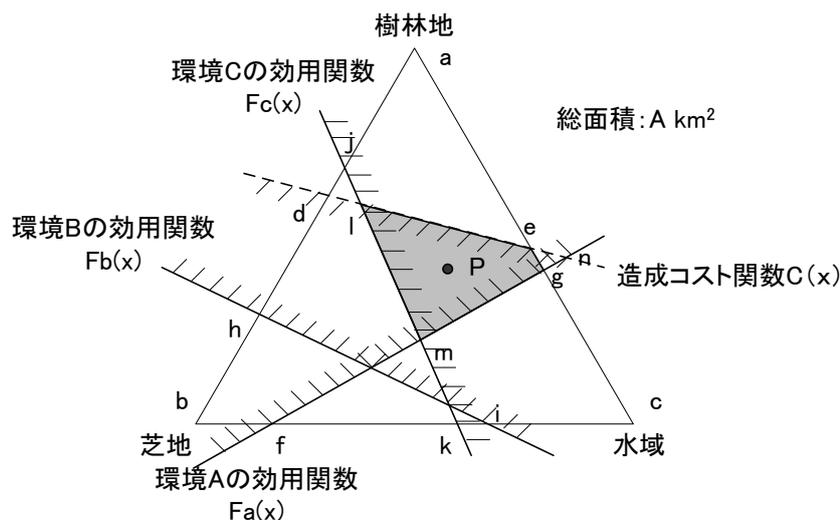


図8.2-1 土地被覆組み合わせ検討の概念図

土地被覆を芝地、樹林地、水面の3項目に限定した場合の造成コスト関数を $C(x)$ 、その制約条件を満足する範囲を $bdce$ 。また、環境質Aの効用関数 $Fa(x)$ 、その効用を満足する範囲を $abfg$ 、環境質Bの効用関数 $Fb(x)$ 、その効用を満足する範囲を $ahic$ 、環境質Cの効用関数を $Fc(x)$ 、その効用を満足する範囲を $ajkc$ と仮定する。この場合の、コストを満足し、すべての環境質の効用を満足させる土地被覆の組み合わせは、図中のグレーで囲まれた矩形範囲 $lmge$ である。なお、環境質ABCの重さが同等とあれば、矩形中でコストと環境質の両面の効用を最大にする土地被覆の組み合わせは、三角形 lmn の中心 P である。

仮に、1kmの区画内に広さ10haの都市緑地整備を実施する仮定し、その整備予算限度14億円、環境目標を15年後1.2°C低下と設定した場合を例として、土地被覆の組み合わせを試験的に検討する。

図8.2-2に、整備予算限度14億円と環境目標1.2°Cを満たす土地被覆の面積率を表した三角ダイアグラムを示す。図8.2-2で $C(x_1, x_2, x_3) \leq 14$ 億円と $Deg(x_1, x_2, x_3, 15) \geq 1.2$ °Cを満たすグレーの範囲に相当する土地被覆の組み合わせが目標達成する組み合わせである。この図中で、クールアイランド効果を最大にする場合の土地被覆構成は、造成コスト関数上の点 $P(x_1, x_2, x_3) = (61, 0, 38)$ であり1.41°Cの気温低減ポテンシャルが得られる。また、クールアイランド効果15年後1.2°C低下の条件を満たす土地被覆で最も造成コストの低い土

地被覆の組み合わせは、点 Q (x_1, x_2, x_3) = (79, 21, 0) であり造成コストは 11.0 億円である。また、グレーの範囲内で両関数との距離が最大となる R 点 (x_1, x_2, x_3) = (81, 0, 19) は、費用対効果の視点から 15 年後の気温 1.2℃ 低下を実現する最適な土地被覆の組み合わせであり、この時の気温低減ポテンシャルは 1.38℃ であり、造成コストは 12.8 億円となる。

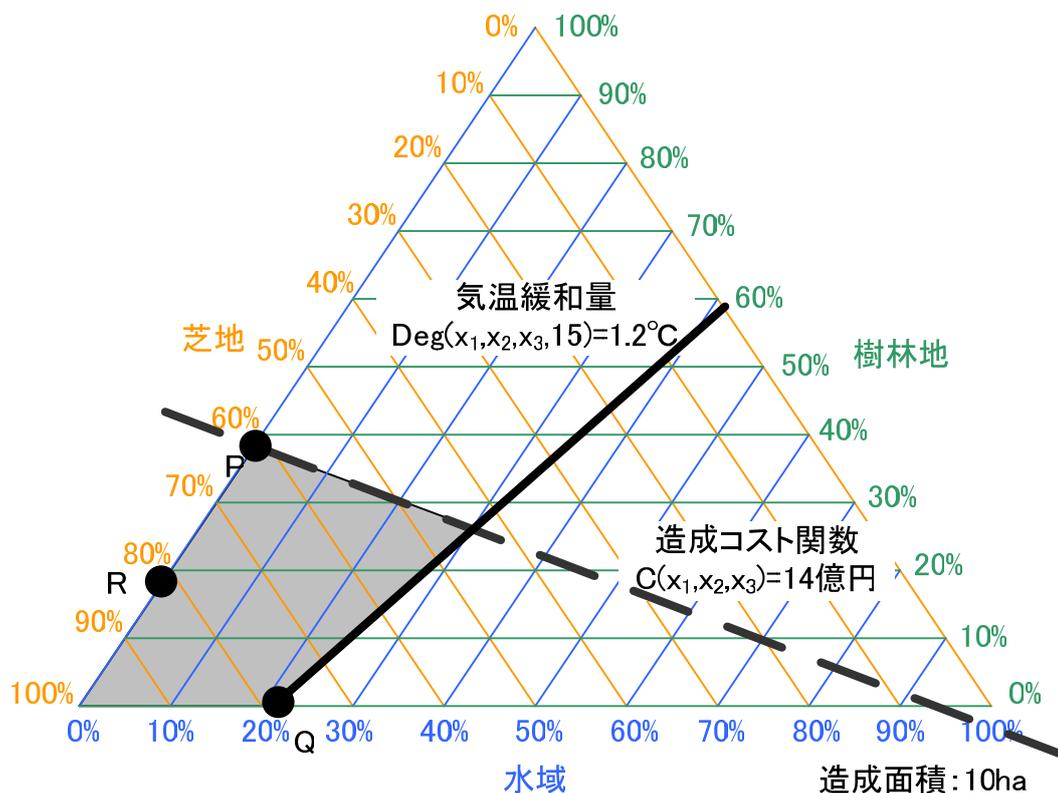


図 8.2-2 整備予算限度 14 億円と環境目標 1.2℃の気温低下を満たす土地被覆の面積率を表した三角ダイヤグラム

また、既存の環境資源を生かした都市緑地造成に関しても発展的に検討することが可能である。先ほどの事例で、仮に 10ha の検討対象範囲内に 2ha の公共水面がある場合を検討する。その場合の造成面積は 8ha であり、水域 20%以上の制限条件が付加される。この場合の、三角ダイヤグラムは図 8.2-3 になり、 $\text{Deg}(x_1, x_2, x_3, 15) \geq 1.2^\circ\text{C}$ と $C'(x_1, x_2, x_3) \leq 14$ 億円の両関数との距離が最大となる R' 点 (x_1, x_2, x_3) = (30, 20, 50) は、最適な土地被覆の組み合わせとなり、この時の気温低減ポテンシャルは 1.32℃、造成コストは 13.2 億円となる。

本論は、クールアイランド効果のみのアプローチであるが、他の環境質を加えることにより、最適な土地被覆の組み合わせの範囲が絞られ、環境効率の高い都市緑地整備が可能となる。

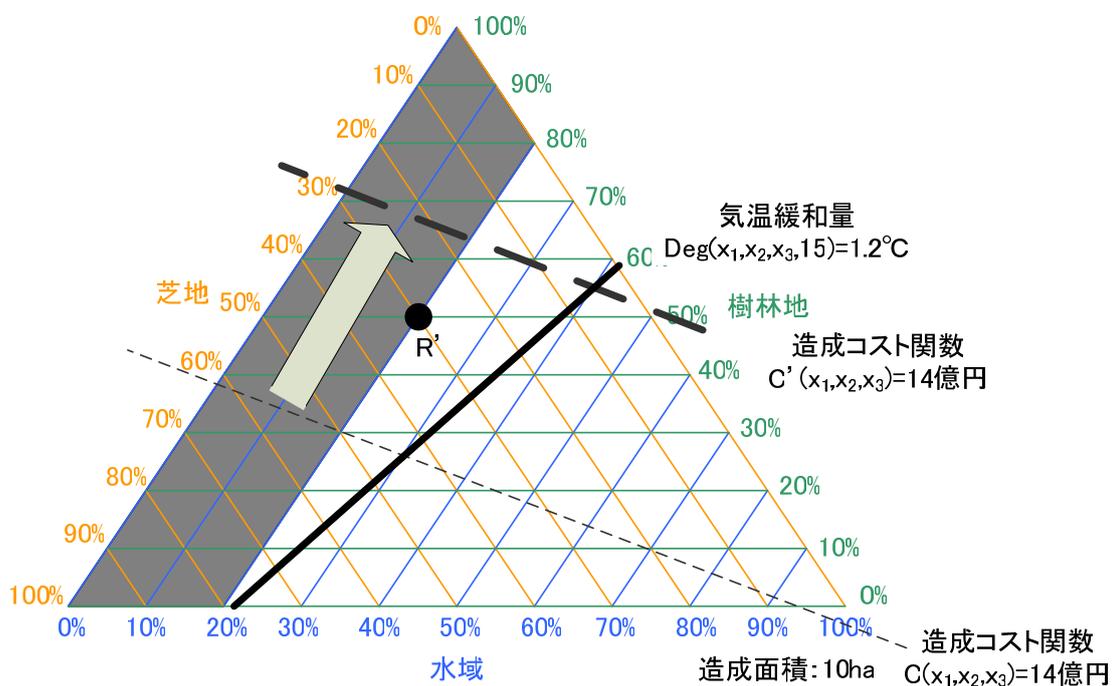


図 8.2-3 水域 2ha を維持したまま、整備予算限度 14 億円と環境目標 1.2°C の気温低下を満たす土地被覆の面積率を表した三角ダイヤグラム

8.3 クールアイランド効果を機能させるための都市緑地の整備方針

これまでの検討結果より、クールアイランド効果を発揮するための都市緑地の整備方針を下記のとおり整理した。

- ・ 夏季に都市気候を緩和する効果を有する潜熱フラックスについて比較すると、南中(12)時の潜熱フラックスは樹林地が最も大きく(約 $469\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)、次いで芝地(約 $401\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)、植生で覆われた水面($163\sim 250\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)、水深50cmの水面(約 $230\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)、水深1mの水面($99\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)の順となっている。樹林地は、水面と比較して固定的でなく樹木が年々成長するためクールアイランド効果が大きくなる特性を有している。これにより、20年後の潜熱フラックスを予測すると、現在と比較して24%増の $582\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ と予測される。20年間のクールアイランド効果の総量を比較すると、浅い(水深50cm)水面を1とした場合、植生で覆われた水面0.92-1.41、水深1mの水面は2.30、芝地は0.57、樹林地は0.39と計算された。このことから、都市の不浸透域の増大による気温上昇の緩和するための手段としては、樹林地と同じクールアイランド効果を求める場合、樹林地面積の1.5倍の芝地面積、2.6倍の水域面積が必要となる(樹齢29年、20年後を試算)。よって、クールアイランド効果に配慮した公園緑地の土地利用計画は、緑地を多くし水面面積を少なくする方針で整備する。
- ・ 底面や壁面をコンクリート・アスファルトで被覆された非対流性の水面は、池の貯熱の一部が底面や壁面のコンクリート・アスファルトへ熱の移動が行われる。特に、公園に分布する池は比較的水深が浅い(50cm程度)場合が多いため、池全体の貯熱量が小さく昼間に過度に太陽熱を貯熱しやすく、大量の熱がコンクリート・アスファルトへと移動する。このため、昼間の水表面の表面温度は常に 30°C 以上を保つとともに、それが夜間にかけても十分に放出されず、水温が高い傾向が明け方にかけても解消されない。よって、熱環境緩和の視点から水面を設置する場合は、コンクリートで覆われたオープンな浅い水深を持つ人工池の設置は避ける必要があり、水深を深くし池全体の貯熱量を増加させること、壁面や底面をコンクリート・アスファルトから泥質又は砂泥質へ構造を改善し池の底面から下層部へ熱の移動を容易にさせること、さらに、常に新鮮な水を供給し池全体を対流させ池の熱量を減少させることが必要である。
- ・ 植生で被覆された水面の潜熱フラックスは、植生のない水深1m程度の水面と比較して2.5倍程度大きいことが示された。よって、都市緑地に水面を設置する際には、水面をヒシモやガガブタ、ハスなど水生植物で被覆し潜熱フラックスを増加させる手段も周辺の熱環境を緩和する対策の一つとして考えられる。その場合の池に対する植生の被覆率は、植物プランクトンの増殖(富栄養化)を抑えるため、池全体の面積に対して3割程度を目標として実施する。これにより、池のクールアイランド効果は植生のない場合と比較して、1.2倍から1.5倍潜熱フラックスは上昇する。

8.4 総合的な都市緑地の環境経済評価モデルの提案

前章までに検討したクールアイランド効果の定量化・将来予測・環境経済評価までの評価モデルを用い、既往の環境経済評価マニュアルと組み合わせることで都市緑地の総合的な環境価値を試算した。

国土交通省では、都市公園を造成する際の事業評価の際に、「大規模公園費用対効果分析マニュアル」⁶⁾（広さ 10ha 以上の都市公園を対象）、「小規模公園費用対効果分析マニュアル」⁷⁾（広さ 10ha 以下の都市公園を対象）を用いて公園の環境的な価値の推定を行っている。マニュアルで提示している環境価値は、表 8.4-1 のとおりであり、表 8.4-1 で提示されていないその公園特有の価値項目に関しては、個別に計測することとしている。

表 8.4-1 公園費用対効果分析マニュアルで提示している環境価値の種類

○ 利用価値 実際に公園を利用する、または将来の利用を担保する価値
● 子供たちに安全な遊び場の提供
● 周辺住民の語らいの場の提供
● レクリエーションの場の提供
● 地域の人々の交流の場の提供
○ 環境価値 都市景観の向上、都市環境を維持・改善する価値
● 緑地の提供
● 動植物の生息の場の提供
● うるおいのある町並みの提供
○ 災害価値 震災等災害時に有効に機能する価値
● 災害・延焼防止の役割の提供
● 一時的な避難場所の提供
● 炊き出しの場の提供
● 情報交換の場の提供

表 8.4-1 で示された環境価値は、1)公園の整備に生じる価値は整備面積に依存する、2)公園の価値は世帯ベースで計測する、ことを前提として、効用関数法を用いて算定している。環境価値の算定モデルは、以下の算定式により算出することとしている。

1) 効用関数の定義

世帯の効用関数は確定項と確率項（誤差項）からなるランダム効用で定義する。

$$U = V + \varepsilon \quad \dots \quad (8-9)$$

$$V = a_1\sqrt{A} + a_2d^2 + a_3(I - x) \quad \dots \quad (8-10)$$

ここで、U は効用、V は効用関数の確定項、 ε は効用関数の確率項、A は公園の規模 (m²)、d は公園からの時間距離 (分)、I は所得、x は世帯の負担額 (円・month⁻¹)、 a_i はパラメータである。

2) 公園の選択確率

地域内に競合する公園が存在する場合における公園の選択性については、以下の算定式により算出する。

$$P_a = \frac{\exp(\lambda V_a)}{\exp(\lambda V_a) + \exp(\lambda V_b)} \quad \dots \quad (8-11)$$

ここで、 V_a は対象公園の効用関数、 V_b は競合公園の効用関数、 λ はガンベル分布を規定するパラメータである。

3) 効用関数を利用した満足度の定義

世帯が公園に対する最大効用の期待値を次式で算定する。

$$S = \frac{1}{\lambda} \ln(\exp(\lambda V_0) + \exp(\lambda V_a) + \exp(\lambda V_b)) \quad \dots \quad (8-12)$$

ここで、 V_0 は、公園を利用しないことの効用である。

なお、周辺に対象公園と競合する公園がまったく存在しない場合は、

$$S_0 = V_0 = 0 \quad \dots \quad (8-13)$$

であり、周辺に競合する公園が複数個存在する場合は、

$$S_n = \ln(\exp(V_0) + \exp(V_1) + \dots + \exp(V_n)) \quad \dots \quad (8-14)$$

4) 世帯便益 EV の計算

公園が存在することによる世帯便益 EV (円・month⁻¹) は、次式で算出される。

$$EV = \frac{S_n - S_{n-1}}{p} \quad \dots \quad (8-15)$$

なお、p は負担金のパラメータである。マニュアルでは、各種のパラメータを 2000 年 8 月に実施したアンケート結果をもとに利用価値、環境価値、災害価値ごとに推定している。現時点で、このマニュアルが都市緑地の環境価値を計測する手法として広く都市緑地行政に用いられている。

本論で提示するクールアイランド効果の評価モデルは、既往のマニュアルや論文等で報告されている都市緑地に関する様々な環境価値に対して、熱環境緩和価値を追加した場合の環境価値を東京と多摩市の多摩中央公園をモデルに算定した (図 8.4-1)。

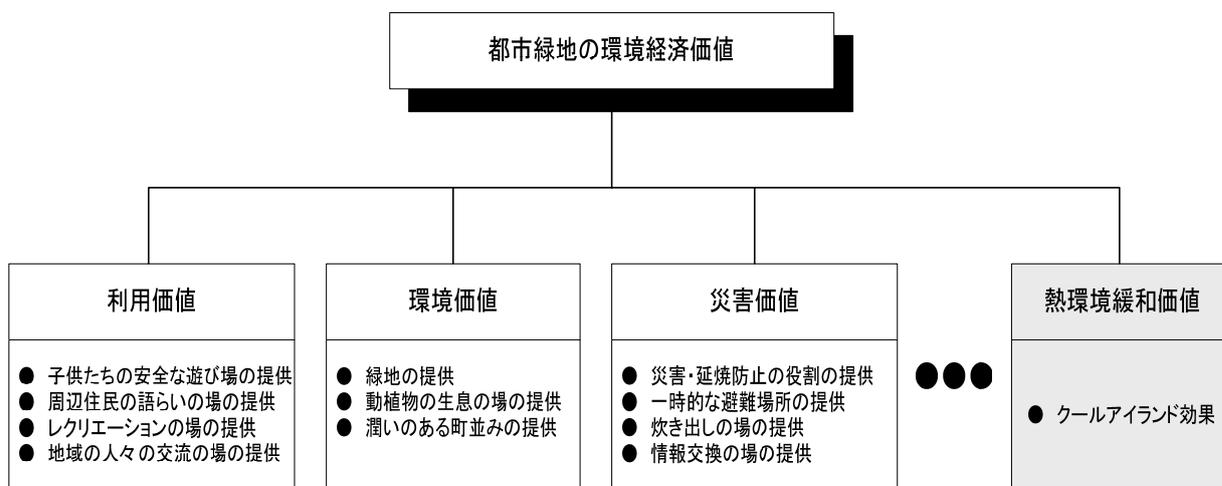


図 8. 4-1 都市緑地の環境経済価値における熱環境緩和価値の位置づけ

多摩中央公園の環境価値を推定するに当たり、多摩中央公園の位置づけを明確にする必要がある。多摩中央公園は、多摩ニュータウンの中心部である多摩センター駅及び商業の中心部と隣接して分布しており、多摩センター周辺の人口密集地域の中の貴重な都市公園として潤いのある地域を提供している。また、公園はパルテノン多摩に代表される教育文化の場を提供する施設が充実し、池およびその周囲には芝生を配置するなど子供の遊び場としての機能や地域住民の交流の場としての位置づけも有する。さらに、公園に隣接している“バンサンカン”は、多摩ニュータウンの情報発信の場となっており、緊急時における情報提供の場としても機能するだけでなく、人口密集地の中のオープンスペースは、災害発生時の避難所になる。このことから、多摩中央公園の環境的な効果としては、利用価値、環境価値、災害価値の3点が試算対象となる。

表 8. 4-2 に環境価値を算定するに当たっての多摩中央公園の諸元を示す。なお、多摩ニュータウン内には、多摩中央公園と同規模の面積を持ち、都市公園としての用途がほぼ同じ公園が6箇所ニュータウン各地に分布している。そこで、多摩中央公園の競合公園はこれら6箇所の公園と設定した。表 8. 4-3 に競合公園の諸元を示す。

マニュアルにしたがって算出した各種環境効果の価値は単年度ベースで、利用価値が7303万円、環境価値が8780万円、災害価値が1億8617万円と算定された。

表 8. 4-2 算出に当たっての前提条件

前提条件	設定値	備考
1) 多摩中央公園を利用する住民の世帯数	77398世帯	多摩ニュータウンの人口動態（東京都南多摩保健所）H. 16. 10
2) 多摩中央公園の面積	10ha	公園管理台帳（住宅都市整備公団南多摩開発局）
3) 多摩中央公園の造成年	1993年	
4) 多摩中央公園の施工費	67. 6億円	
5) 多摩中央公園の管理コスト	3401万円	国土交通省「単位面積当たり維持管理費」より算出
6) 検討年数	50年	小規模公園費用対便益分析マニュアル
7) 割引率	4%	小規模公園費用対便益分析マニュアル

表 8. 4-3 競合公園の諸元

競合公園	面積
長池公園	19.7ha
稲城中央公園	16.1ha
小山内裏公園	39.35ha
大塚公園	8.27ha
富士見台公園	9.27ha
上柚木公園	10.24ha

次に、多摩中央公園を対象としたクールアイランド効果の環境経済性を評価する。評価に当たっては、現在の土地被覆が将来にわたって変更せず、日射などの気象条件も現在の状態がそのまま継続するとして、クールアイランド効果は夏季（7月から9月まで）均一に継続すると仮定して試算していく。

表 8. 4-4 に、現況から 50 年後の潜熱フラックスの推移と単年度ベースの環境経済試算結果を示す。

表 8. 4-4 多摩中央公園のクールアイランド効果による環境経済価値の推移

	公園全体の平均潜熱フラックス (Wm^{-2})	熱環境緩和にかかる経済価値(円)
現況	370. 1	69, 616, 651
10年後	410. 0	77, 117, 784
20年後	436. 1	82, 029, 879
30年後	436. 1	82, 029, 879
40年後	436. 1	82, 029, 879
50年後	436. 1	82, 029, 879

その結果、多摩中央公園のクールアイランド効果による環境価値は、樹木の生長により、

現在価値で現況の約 6962 万円から 50 年後には 17.8%増の 8511 万円と増加した。この効果による価値は、前述の利用価値や環境価値と匹敵する額である。以上の環境価値の計算結果より、多摩中央公園の費用対便益の分析を試行的に実施した。分析に当たっては、評価年度を 50 年と設定し、割引率を 4%と設定して実施した。表 8.4-5 に多摩中央公園における費用対効果分析結果を示す。既存の環境価値の推定法の場合の B/C は 6.57 で算出されたのに対し、ヒートアイランド効果を導入した場合、8.05 と増加している。本結果は試算レベルに過ぎないが、環境価値の推定結果と比較してもクールアイランド効果の価値は無視できる大きさではない。今後、都市緑地のクールアイランド効果は、ヒートアイランドが深刻化する中で地域住民の共通の財産であり、都市環境問題における都市公園の整備や地域計画の策定の際の新たな視点として位置づけられるべきであると考え。

表 8.4-5 多摩中央公園における費用対効果分析結果

	マニュアルで定義された環境価値	クールアイランド価値	建設費	管理費
現在	347,009,219	69,616,651	422,287,693	34,010,000
50年後	48,828,575	11,562,639		4,785,636
合計	7,801,525,317	1,752,662,614	422,287,693	764,619,099

第9章 クールアイランド効果を保全するための持続的・自立的な

都市緑地の環境管理・経営モデルの提案

本論ではこれまでに、都市緑地に対して熱環境の視点から地域環境緩和効果を定量化し、その環境経済性を推定した。一般に、都市緑地の熱環境緩和効果を維持するためには、樹林地や水面などのクールアイランド源を保全すること、及びコンクリート面などのヒートアイランド源が増加することを防止する環境維持管理計画が必要である。このためには、花卉や芝地における下草の除去や樹木の剪定や下草刈を適切に実施し、芝地に対して散水を実施すること、及び環境教育を継続的に行うことにより、都市緑地の荒廃を防止するとともに芝地や水面、樹木を良好な状態を維持しクールアイランド効果を最大限に発揮させることが可能となる。都市緑地のクールアイランド効果を維持するためには、緑地を対象として環境面での適切な維持・管理・運営が不可欠であると考えられる。

近年、都市緑地の環境管理・運営を地域住民や NPO（民間非営利組織）が担当し、市民が義務と責任を共有しながら緑地管理を実施していく手法が注目され始めている。海外、特に米国では、NPO の活動が活発であり、地域における社会問題の解決には地域住民や管理者の自主的な取り組みが重要であるという意識と概念が浸透している。NPO による都市緑地の環境維持管理手法は、限られた予算内で地域コミュニティと密接な関係をつくり社会事業に貢献しているだけでなく地域住民の環境意識の向上などの成果をもたらしており、我が国においても適用が模索されている。

本論では、はじめに都市緑地が持つクールアイランド効果に配慮した持続的・自立的な環境管理モデルを提示し、次に、都市緑地のクールアイランド効果を地域の次世代を視野に入れて持続させるモデルとして、三位一体（行政、地域住民、NPO(大学)）のコンセプトに基づいた自立的・持続的な緑地管理・経営モデルを「石土池」を例に PCM(Project Cycle Management) 手法を組み入れて検討した。

9.1 都市緑地の環境維持管理手法の一般論と動向

9.1.1 環境維持管理手法

9.1.1.1 維持管理の目的

都市緑地の維持管理は、利用者に利便や快適さを与え、しかも安全かつ適正に都市緑地の機能を維持するために行われる技術的な管理行為を指しており、都市緑地が設置され利用が開始されると同時に維持管理が始まる。都市緑地は計画・整備され、都市緑地が持つ公益的機能が発揮した場合、その計画に基づいて最も良好にその機能を維持することが維持管理の目的であり、都市緑地が何のために設置されたか、常にフィードバックを行う必要がある。

9.1.1.2 都市緑地の維持管理の内容

都市緑地の構成は、①樹林地、花卉、池などの修景施設、②遊歩道や広場、③休憩所、ベンチ、ぶらんこ、テニスコートなどの休養・遊具・運動施設、④駐車場、便所などの便益施設、⑤柵、照明施設などの管理施設に大別される。都市緑地における維持管理の特性は、建築、設備の維持管理のみならず、樹木や芝地・花卉類などの公益的機能を持続させるために行われる。維持管理の手段としては、定期的な巡回点検、清掃、緑地施設の機能を維持するために必要な手入れ・補修、植物の生育だけでなく、都市緑地に対する価値観の変化に対応するための改良や改造まで含まれる。

9.1.1.3 都市緑地の維持管理計画

(1) 維持管理計画の条件

維持管理計画を策定する場合、環境条件、施設条件、運営条件を考慮して策定する必要がある。

① 環境条件

土壌、地形、温度、湿度、雨量、日照などの自然条件及び利用頻度などの人為条件による数々の影響

② 施設条件

管理対象施設の種類、設置目的、規模など

③ 運営条件

制度、組織、予算、財源など

(2) 維持管理の時間的計画

維持管理の時間的な計画には、日単位・月間単位のように短期的のもの、年間単位のもの、数年から数十年の長期にわたるもの等があり、時間的なオーダーにより段階的に計画していく。

① 短期的な維持管理項目

巡回点検、清掃、観察による定期的点検が対象になり、これらの計画に基づいて日々の作業計画を策定する。

② 年間単位の維持管理項目

樹木の剪定、芝の刈り込みや施設の保守・点検などが対象となり、年間の気候と植物生理、利用状況などを考慮して策定する。

③ 長期的な維持管理項目

枯損を生じた植物の補植、各施設の補修・改良などが対象となり、施設の種類により耐用年限を定め補修・改良の計画を策定する。

9.1.2 都市緑地の維持管理体制の動向

近年、行政側でいわゆる“規制緩和”が各方面にて実施され、これまでの行政主体であった事業や行政サービスに風穴が開けられ、住民や企業が自由な発想で事業を実施できるようになってきた。都市緑地の分野に関しては、2002年の自然公園法改正により、公園管理団体制度が適用された。公園管理団体制度とは、自然公園法の規定に基づき、環境大臣（国立公園の場合）又は都道府県知事（国定公園の場合）が指定する団体。国立・国定公園の管理業務を行う能力を有する公益法人、NPO法人等の民間団体が申請により指定され、公園内の登山道等施設の補修、風景地保護協定に基づく自然風景地の保護管理や公園利用者への情報提供などを行う制度であり、民間団体や市民の積極的な参加により地域に密着した公園管理を推進するため創設された。これにより、住民が主体的に参加する公園管理計画は、2003年に、栗駒国定公園「NPO法人須川の自然を考える会」、阿蘇九重国立公園「(財)阿蘇グリーンストック」が、それぞれ国定公園と国立公園の公園管理団体第1号として指定され、さらに東京都では「都立公園の整備と管理のあり方について」の答申で都民やNPOなどとの協働・連携マネジメントを推進していくなど、日本全国に浸透しつつある。しかし、日本においては現時点では模索の段階であり、この点はNPO先進国である米国での研究事例が豊富である。

以下に、日本及び米国におけるNPOやNGOが都市緑地の管理や運営、環境教育の参画している事例を示す。

9.1.2.1 長池公園（東京都多摩市）周辺の地域管理

長池公園は、東京都多摩ニュータウンに位置する、この辺りは多摩ニュータウンとして開発が進み、今では近代的な住宅地へと姿を変えているが、かつては多摩丘陵の直中に位置する山間の農村だった。長池公園はその当時から残る農業用水の溜め池とその周辺の里山の自然を残し、里山文化の継承と住民コミュニティの形成を公園のテーマと設定し、整備された公園である。表9.1-1にNPO法人フュージョン長池の活動内容を示す。

表 9.1-1 NPO 法人フュージョン長池活動内容¹⁾

活動項目	非営利事業活動	ボランティア活動
住宅に関する活動	住見隊事業 窓口管理・事務管理サービス・コンサル ディング 夢見隊事業 コーポラティブ住宅の建設のための調 査を都市公団の支援を受けて実施	
地域コミュニティ に関する活動	祭再々事業 イベントの誘致、事務局	地域で開催されるイベントのコー ディネート
健康に関する活動	元気印事業 地元クリニックと相談し、地域の 医療ネットを提案中	スポーツ大会の開催
ゴミに関する活動	リサイクル事業 地域の酪農家と協力し、生ゴミと 牛糞を混ぜた堆肥を製造・販売	年に1度近隣の小川を清掃
消費に関する活動	買い物お助け隊事業 水の販売	
教育に関する活動	隣の先生事業 画像を含めた教材情報をインター ネットに乗せて配信	
育児に関する活動	育ての親事業 NPOとして保育園の経営を計画	
環境に関する活動	里山事業 公園の管理と運営を提案中	地域の20haの公園（公団所有）で の里山活動
介護に関する活動	起寝活生事業 地域のクリニックと協力し、高速 インターネットを使用した在宅介 護ネットワークの可能性	介護支援センターの紹介
情報に関する活動	高度情報化支援事業 多摩ニュータウンLAN構想	PCレスキュー隊

長池公園の管理運営に当たっては、多摩ニュータウン（東京都）のNPO法人であるフュージョン長池が現在のところボランティアとして参画している。NPO 法人フュージョン長池は、多摩ニュータウンの西「ライブ長池」周辺の 10,000 世帯を対象に活動している。平成 6 年の管理組合理事が「コミュニティ委員会」を結成したのが活動の起点となり、翌年、地区の情報交換会を結成、平成 10 年にはメーリングリストの導入により、一気に活動が拡大した。1999 年 12 月に法人格を取得し、現在約 350 人が参加し、年間総事業費は約 1000 万円、事務局員は 3 名で運営している。

このNPOは、暮らし全般をカバーする「暮らしの支援事業」として、表 9.1-1 のような活動を行っている。現在、本NPO団体は住都公団に対し、長池公園の公園管理運営の委託について働きかけを行っており、2001 年 7 月からは八王子市より委託を受けて、八王子市長池公園自然館（長池ネイチャーセンター）の管理運営を行っている¹⁾。

9.1.2.2 米国ヨセミテ国立公園環境管理

ヨセミテ国立公園は、アメリカ・カリフォルニア州シエラ・ネバダ山脈内にあり、サンフランシスコから自動車です約 5 時間という比較的交通の便の良いところに位置している。

3,029平方キロ(東京都の約1.5倍)もの広大な面積の中に世界一の一枚岩エルキャピタン、ハーフドームなどの壮大な風景のヨセミテ渓谷、世界一の大きさと寿命をもつジャイアントセコイアの森、そして高原地帯、山岳地帯など多様な環境が存在している。

現在、アメリカの国立公園は、原生自然環境の維持と保全、人々が平等に利用できるレクリエーション施設の整備と機能的な運営、利用者に自然と歴史への理解を深めてもらう運営サービスが主要な任務であり、大統領の直轄下である国立公園局がその計画立案及び実施にあっている。ヨセミテ国立公園における管理運営は、国立公園局に属するヨセミテ国立公園を統括する公園長のもと、電気・上下水道・道路の保守管理をおこなう「維持管理部門」、「法律部門」「経営管理部門」「資源管理部門」「インタープリテーション部門」「委託サービス部分」より構成されている。1999年度は連邦政府から2,035.7万ドル予算が提供され、それ以外入館料の一部が一般会計として約1,000万ドル計上されている。ナショナル・パーク・サービス発行の資料によると、1999年8月現在レンジャーは通常605人在籍しており、繁忙期である夏季には831人(+226人)に増員される。ヨセミテ公園における公園の管理・運営体制を図9.1-1に示す。

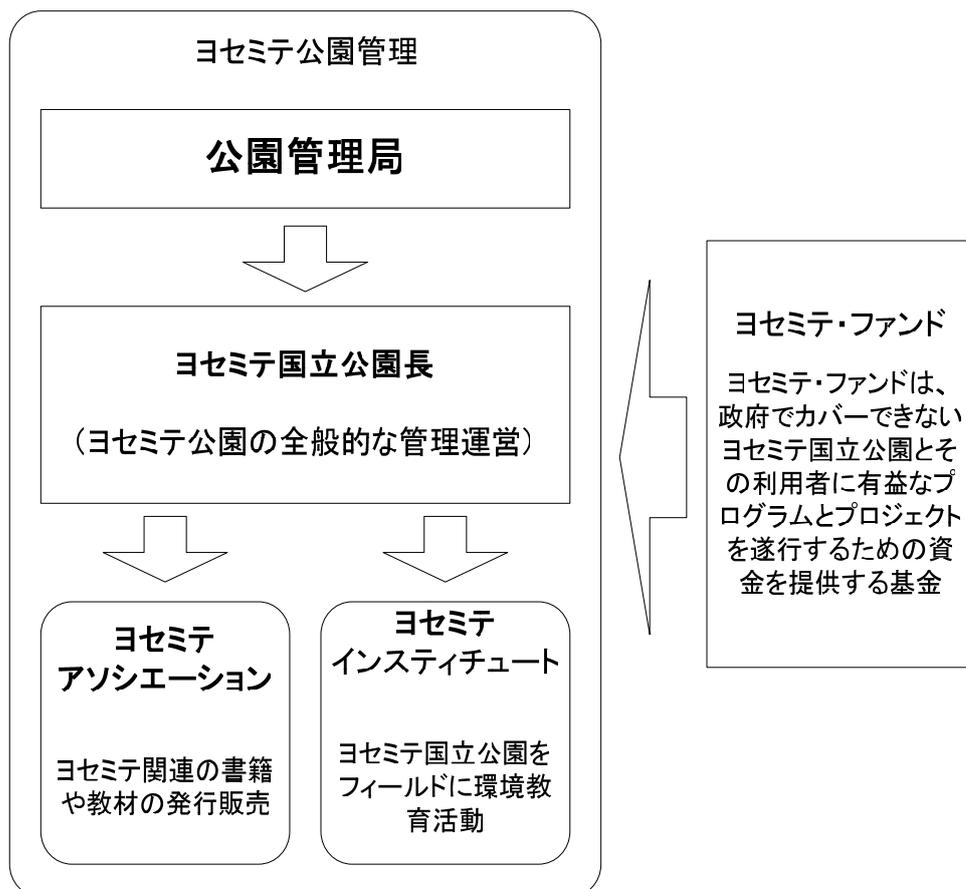


図9.1-1 米国ヨセミテ国立公園管理体制

図 9.1-1 に示すように、ヨセミテ公園を管理し「保護と利用」に責任を持っている組織が公的機関の公園管理局で、公園内のあらゆる価格や営業活動に制限を加えている。公園管理局の下で、NGO であるヨセミテアソシエーションがヨセミテ関連の書籍や教材の発行販売やフィールドセミナーやヨセミテ・シアターの開催を行い、公園管理局をサポートしている。書籍の販売等で得た収益は公園管理局へと寄付され、ヨセミテの自然、文化、歴史（遺産）をわかりやすく人々に伝える活動をはじめとして文化施設整備や研究プログラムの施設資金として提供されている。また、ヨセミテ・インスティテュートは、ヨセミテの自然を次の世代に残すため、全世代からの賛意を取り付けることを目的として、ヨセミテアソシエーションと同様に公園管理局の保護の下 NGO 団体として設立された。ヨセミテ・インスティテュートは、自然界の多様なしくみを理解でき、かつ政治的に偏らず環境や自然保護について考えることができる人間の育成を主眼に、各種学校（ヨセミテ・ナショナル・インスティテュート）を開催してヨセミテ国立公園をフィールドに環境教育活動をおこなっている。ヨセミテ公園の管理にかかる費用は一般的に公園管理局からの補助金でまかなわれるが、政府でカバーできないヨセミテ国立公園とその利用者に有益なプログラムとプロジェクトを遂行するための資金を提供する基金としてヨセミテ・ファンドを設立している。ヨセミテ・ファンドの使命としては環境の復元、野生動物の管理、訪問者の経験を促進するための文化的・歴史的な資源の科学的な研究に対して資金提供をしている²⁾。

9.1.2.3 セントラルパーク（米国ニューヨーク）公園管理

ニューヨークの中心に位置しているセントラルパークにおいて公園管理に NPO が主体的に果たしている事例を紹介する。

セントラルパークは、19 世紀の半ば、都市化に伴うさまざまな弊害が指摘され始めた時期に、ジャーナリストでアメリカ・ロマン派詩人のウィリアム・カレン・ブライアント氏の提唱により構想され、1858 年の着工から約 20 年の歳月を経て完成した都市型公園である。今や世界の経済の中心地であるマンハッタンの中心に位置するこの公園は、南北 4km、東西 800m、約 341 万 km² の広大な敷地面積を有し、公園内には美術館、劇場、遊具施設、貯水池、動物園など数々の施設を備える。セントラルパークは、庭を持たないマンハッタンの住民にとって、身近に自然を堪能できる唯一の場所といっても過言ではなく、現在、マンハッタンに勤務するビジネスマンの他、観光客、ニューヨーク市民など年間約 2000 万人が訪れており、国内のみならず世界でも最も人気のある公園の 1 つとなっている。

NPO が主体となったセントラルパークの公園管理の試みは、1970 年代にさかのぼる。1970 年代後半、セントラルパークは麻薬や暴力、殺人などの犯罪の温床と化していた。ニューヨーク市民はこうした状況を改善するため、いくつかの市民団体が団体を組織して、セントラルパークの維持管理のためのボランティアや寄附を募る活動を行い、セントラルパークを再生させるための運動が始まった。これらの運動を背景に、1980 年に、ニューヨ

ーク市公園管理局（City of New York Department of Parks and Recreation）との契約のもと、セントラルパークを管理している NPO として、セントラルパーク管理委員会（Central Park Conservancy）が設立された。図 9.1-2 にセントラルパーク管理委員会の管理内容を示す。

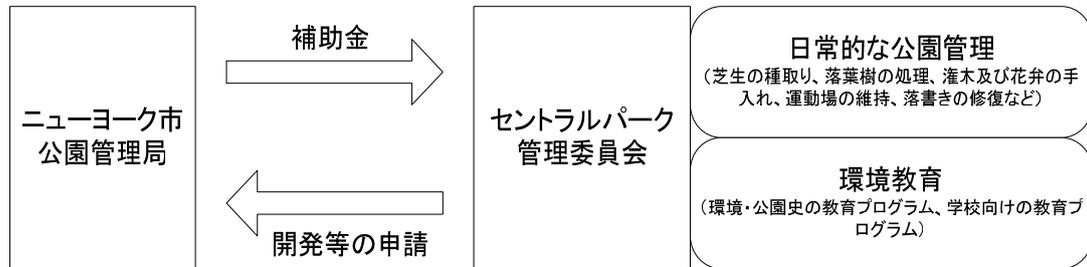


図 9.1-2 セントラルパーク管理委員会の業務内容

セントラルパーク管理委員会はその設立以来、ニューヨーク市と共同で主要な景観や歴史的建造物の修復及び維持管理を行っており、業務内容は大きく以下の2点である。

・日常的な公園管理

委員会は主に公園の日常管理を請け負うこととなり、細かく明示された活動範囲（芝生の種取り、落葉木の処理、灌木及び花卉の手入れ、運動場の維持、落書きの修復、モニュメント、歴史的建造物の保存修復、森林の管理、下水処理装置の維持管理、公園内の湖・河川の保護管理）に従って公園を維持管理する。

・環境教育

セントラルパークという資産を利用し、環境・公園史の教育プログラム及び若者、家族、コミュニティ、学校向けのレクリエーション・プログラムを提供し、ボランティアに対しても公園整備のプログラムの提供を行っている。さらに、管理委員会はビジターセンターでの年間を通じて数百のプログラムを提供する。

セントラルパーク管理委員会の財政状況は、活動資金として、ニューヨーク市公園管理局からの補助金の他、多くの個人や団体及び基金から資金調達を行い、公園の修繕や職員の賃金を支払っている。

セントラルパークを管理する上での実施決定手順を図 9.1-3 に示す。

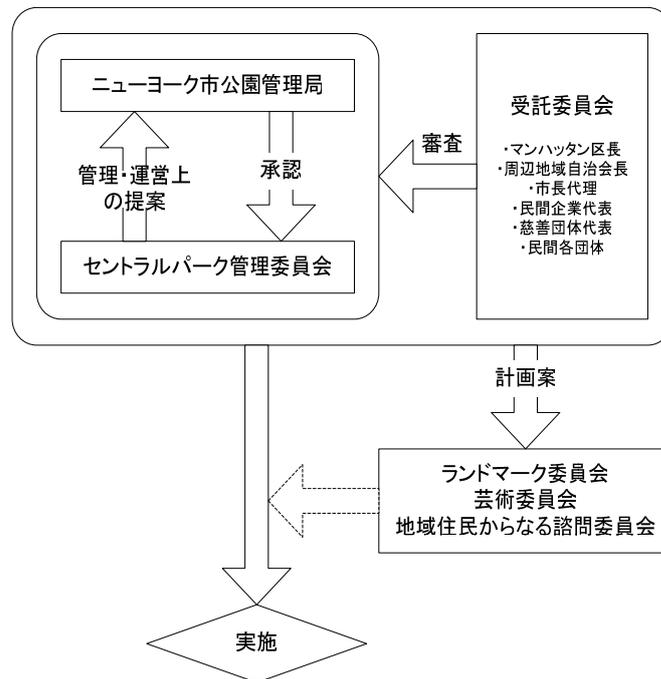


図 9.1-3 セントラルパークにおける管理運營業務の意思決定手順

ニューヨーク市は、セントラルパークの開発に対して一切の権利を保持し、すべての公園でのイベントに対しても自由裁量権を保持することとなっており、これにより、公園の主要な改善については、開発の各段階でニューヨーク市公園管理局の承認が必要となる。また、セントラルパークは常に公共の公園でなくてはならないという考えから、市の公園管理局委員会の承認以外にも、パブリック・レビュー（公的審査会）を受けることが義務付けられており、マンハッタン区長、周辺地域自治会長、市長代理、民間企業及び慈善団体を代表とする民間各団体からの代表者ら委員 60 人で構成される受託委員会を設け、公園利用者や周辺地域コミュニティの意見を求めることとなっている。最後に、この計画案を、ランドマーク保存委員会（the Landmarks Preservation）及び芸術委員会（Art Commissions）などにも提出し、地域住民からなる諮問委員会とともにプログラムの企画実施に当たる³⁾。

9.1.2.4 事例研究のまとめ

日本における NPO や NGO による公園管理の事例は、2002 年の自然公園法改正により地域住民や企業等による管理・運営の実施がようやく端緒についたばかりであるため、現時点では窓口管理・事務サービスやゴミのリサイクル、地域の情報配信などが主な業務内容である。よって、現段階ではボランティアの域を脱せず、今後の取り組みに期待する向きが強い。その中で、NPO 先進国である米国の事例は、今後の日本における公園緑地の管理の方向

性を示すものとして期待できる。

前述のとおり、米国では地域における社会問題の解決には地域住民や管理者の自主的な取り組みが重要であるという概念が浸透しており、NPOによる公園管理の活動が活発である。ヨセミテ公園やセントラルパークにおける事例を見ても、NPOが自律性を保ちながら、行政と対等な立場で連携している。NPOの活動内容を見てみると、公園管理、環境教育、公園内におけるイベント開催、公園関連書籍の販売が挙げられ、1つ若しくは複数のNPOが担当している。これらNPOの活動は行政（公園管理局）が一括して管理しており、公園の主要な改善については、開発の各段階で行政の承認が必要となっているが、NPOなどの管理団体は自由な発想にて計画を立案し、地域住民などの審査を受けて実施されている。

また、米国の公園管理関連のNPOが力を入れて実施しているものとして環境教育が挙げられる。都市緑地の各種機能を持続させるためには、適切な環境管理の他に環境管理することの重要性を地域住民に認知させ、それを後世に伝えていくことが重要である。NPOは環境教育を実施する場として公園内に環境関連の学校を設立し、若年層（小学生や中学生）を主なターゲットとして公園の歴史や生態系、自然保護についての教育を実施している。

これら環境管理や環境教育など公園の維持管理運営にかかる費用は、基本的には政府からの補助金で実施されているが、このほかに各種基金を設立し、広く一般国民からの寄付によりまかなわれている。

このように、米国における公園管理は、公園管理運営を担当するNPO、NPOの活動を統括する行政、行政とNPOの活動を審査するとともに積極的に管理運営に参加する地域住民が結合して好循環に機能しており、環境教育を実施することによりこの結合がより効果的・持続的に循環し、公園の管理運営を成立させている。

9.1.3 環境教育の動向

都市緑地を美しい状態のまま後世に引き継ぐためには、適切な管理を継続的に実施するだけでなく、我々人類が自然の管理の重要性を後世に伝えるための教育（環境教育）が必要である。環境教育という概念は1975年のベオグラード憲章にさかのぼる。ベオグラード憲章で環境教育の目的は、次のように定めている。

“環境教育の目的は、個人と社会集団が、相対的な環境とそれに関わる問題について、関心と感受性を持ち、人類の重大な立場と役割を理解し、環境の保護・改善に参加する意欲と、問題解決のための技能及び評価能力を身につけ、また適切な行動を起こすために、環境問題に対する責任と、事態の緊急性についての認識を深めることができるようにすることである”

わが国における環境教育の必要性の討論は、1993年の環境基本法やこれに基づく1994年策定の環境基本計画の決定を受けて“環境教育の必要性”や“その具体的推進方策”について議論され始め、現在一部の学校やNPOが試験的に実施している。

9.1.3.1 国営木曽三川公園の取り組み

岐阜県海津町に位置する木曽三川公園センターは、木曽、長良、揖斐の木曽三川が隣接する地点に広がる日本最大級の国営公園であり、水と緑の館や「水屋」という輪中独特の農家の復元建物、木製遊具や芝生広場などがあり家族連れに人気があり、4月初旬に行われるチューリップ祭は特に人気となっている。

木曽三川公園センターの「水と緑の館」には、誘致圏である岐阜・愛知・三重の全小学校の約44%に相当する800校の約7万人が毎年社会科見学で訪れており、歴史文化だけでなく、水の汚染やゴミ問題など身近な環境問題について、環境教育の手法によりわかりやすく体験できる「環境教育講座」を試行的に導入している。

環境教育のプログラムは、公園が持つ歴史・自然資源を十分生かして中央水郷地区の自然や歴史を学べる20種類の教育プログラムを開発し、少人数から学校単位の利用までを考慮したい対象年齢別・時間別・季節別など利用者の要望に応じて教材を選べるようにしている。教育プログラムの内容は、子供の視点に立って、ビンゴゲームや宝探しなど楽しく遊びながら自然や歴史を発見し、理解を深め、自然を見る目を磨き多様性に気づいていくものになっている。

木曽三川公園センターには、公園の管理運営に協力するNPOの活動拠点施設であるパークセンターを設置し、展示や交流の場となる「交流サロン」、環境教育の拠点となる「環境学習センター」と位置づけ、効果的な環境教育の場となっている（表9.1-2）⁴⁾。

表 9.1-2 環境学習教材の内容一覧表（国営木曽三川公園）⁴⁾

◎：重要な活動 ○：関連がある活動

プログラム	育てたい能力																			
	1 公園の宝物探し	2 生き物の出合いのマップ。	3 ヒ、ンコ、で公園めぐり	4 みんな違って実んなイイ	5 見つけたよ！ 同じ色！	6 ネイチャーハント	7 つながりの旅	8 お宝なんでも回収団	9 「渡り」はつらいよ	10 ミツシヨン イン ホシフル	11 足もとの隣人	12 カヌーで宝探し	13 カヌーでネイチャーハント	14 タイムトラベル！城下町	15 ロストワールドを探せ	16 治水神社の秘密発見！	17 千本松原の謎を探れ！	18 展望タワーから見えるかな	19 みつけたよ！春夏秋冬	20 違うかな？ 同じかな？
完成	① 環境の意識化	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	② 感受力	◎	◎	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	○	◎	◎	○	◎	◎	◎	○	◎	◎
	③ 想像力	◎	◎	◎	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	◎	◎	◎	◎
技能	① 環境資源発見	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	② 情報収集・調査	○	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	③ 情報処理				○			○		○	◎				○					
	④ 分析・課題発見		○		○		○	○		○	◎		○		○	◎	◎	◎	○	◎
	⑤ コミュニケーション・表現	◎	◎	○	○	◎	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
理解	① 生態系・多様性	○	◎	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎		○	○	◎	○
	② 関係性・相互依存	○	◎	◎	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎		○			○
	③ 循環・平衡				○		○	◎	◎		○	○	○	○	◎					
	④ 社会経済システム			○				○	○	○				◎	◎				○	
	⑤ 歴史・文化・ライフスタイル	○	○	◎	○		○	○	◎	◎			○	○	◎	◎	◎			○

9.1.3.2 武蔵丘陵森林公園

武蔵丘陵森林公園は、明治百年記念事業の一環として「都市住民に良好な自然環境の場を提供する」ために、埼玉県滑川町に設置した国営公園である。武蔵丘陵森林公園は、昔ながらの自然が残る雑木林が中心で広場や溜池が点在し、他では少なくなったハルゼミ、ジャコウアゲハ、カブトムシなどの昆虫が舞い、アカマツとコナラの雑木林内にキンラン、ジュウニヒトエ、ヤマユリやリンドウなどが咲き、キツネ、ノウサギ、トウキョウサンショウウオ、オオタカが生息するなど東京近郊では数少ない自然豊かな公園となっている。

豊富な森林環境を生かした環境教育プログラムは、1974年の開園以来続けられており、現在表 9.1-3 に示すような環境プログラムを実施している。森林公園で実施している環境教育プログラムは、対象者や実施形態により以下の3つに分けられる。

・体験参加型プログラム

学習意欲のある利用者のため的一步ステップアップした形の教育プログラムとして、植物管理により発生する材料を利用した籠づくり、クリスマスケーキづくり、青竹クッキング、押花教室など体験・実習を行う「森の教室」を実施している。また、「雑木林体験イベント」は、日曜日に開催しており、雑木林の下草刈り、間伐や落葉掃きなどの体験作業の中に炭焼やカブトムシを養成する堆肥作りやシイタケ栽培などを取り入れている。

・自主活動団体との協働プログラム

自主活動団体との協働プログラムとしては、「武蔵丘陵森林公園の自然を考える会」と「自然観察会」や「自然を感じる会」を企画し、野生生物の記録や保護作業計画を作成したり、生物調査や育成作業を地域住民とともに実施している。

・管理作業への参加型プログラム

1998年から中高年層を中心とした「遊びの学校」を開設し、芳香療法、染色、キッチンリースなど日常生活に直結した活動を行うほか、都市緑地の管理作業の一部をサポートする活動も行っている。

表 9.1-3 環境教育プログラム（武蔵丘陵公園）⁵⁾

○ 雑木林の自然を活かした総合的な体験学習	
森林公園の広いフィールドを利用して植物や動物の観察、コースターや竹コップ作り等いろいろな体験学習を通じて里山の働きと自然の循環について総合的に学ぶことができる	
	ネイチャーハント
	ネイチャーアドベンチャー
	エコオリエンテーリング
○ 社会体験学習	
社会体験の重要性の観点から、里山保全作業を通じ、必要性や作業相互間の関係・関連を学ぶことができる	
雑木林の下草刈り(林床管理)	
	炭焼
	しいたけの栽培
	雑木林アート
	森のピザ作り
	森の染物
○ 自然観察学習	
里山の自然の中で、五感を働かせて植物や動物を観察しながら、自然に直接触れることにより、自然に対する理解と自然の素晴らしさを学ぶことができる	
	野鳥の観察
	植物の観察
	動物の観察
○ 生態系への理解・気付きを深める学習	
何を考えるかではなく、どのように考えるかを学ぶことができ、楽しみながら学ぶことができる	
	みんなのトンボ園
	森のウサギ
	森のかくれんぼ
	ウサギとキツネ
	渡りはつらいよ

施設などのハード面における環境教育の手法として、実施団体の規模や予算規模に応じて以下に示す3とおりの手法が挙げられる⁵⁾。

- ① NPO 等が独自に環境関連の学校を設立し受講者を募集する。受講は基本的に有料で、地球環境から生物、対象とする公園の概要、環境保護などについて専門家から講義を受ける。
- ② 公園管理団体の施設に展示館などを設置し、展示館のスペースで来場者を対象に簡単に対象とする公園の概要や生物などを紹介する。
- ③ 公園管理団体が学校に対して環境教育プログラムを提供する。

9.2 クールアイランドを持続させるための都市緑地の環境管理モデルの検討

本節では、クールアイランド効果を保全するための環境管理モデルについて検討した。

9.2.1 クールアイランドを持続させるための環境管理目標の設定

都市緑地が持つクールアイランド効果を保全するため必要となる維持管理フローをロジックモデルを用いて検討した。図 9.2-1 に、目的を達成するための具体的な管理項目との管理効果との因果関係を示す。都市緑地のクールアイランド効果を保全するためには、まずクールアイランド源が保全されヒートアイランド源を増加させないことが第一の環境目標となる。このためには、都市緑地を構成する花卉や樹木が健全に生育しクールアイランド効果が持続していること、水面がある緑地は、水量が十分に確保され池の貯熱量が損なわれないことが必要である。また、都市緑地の利用者がゴミ捨てや落書きなどをせず一人ひとりが良心を持ち緑地を利用すると、緑地と住民の意識距離が離れず緑地を良好な状態に維持しクールアイランド効果を最大限に発揮させることが可能となる。

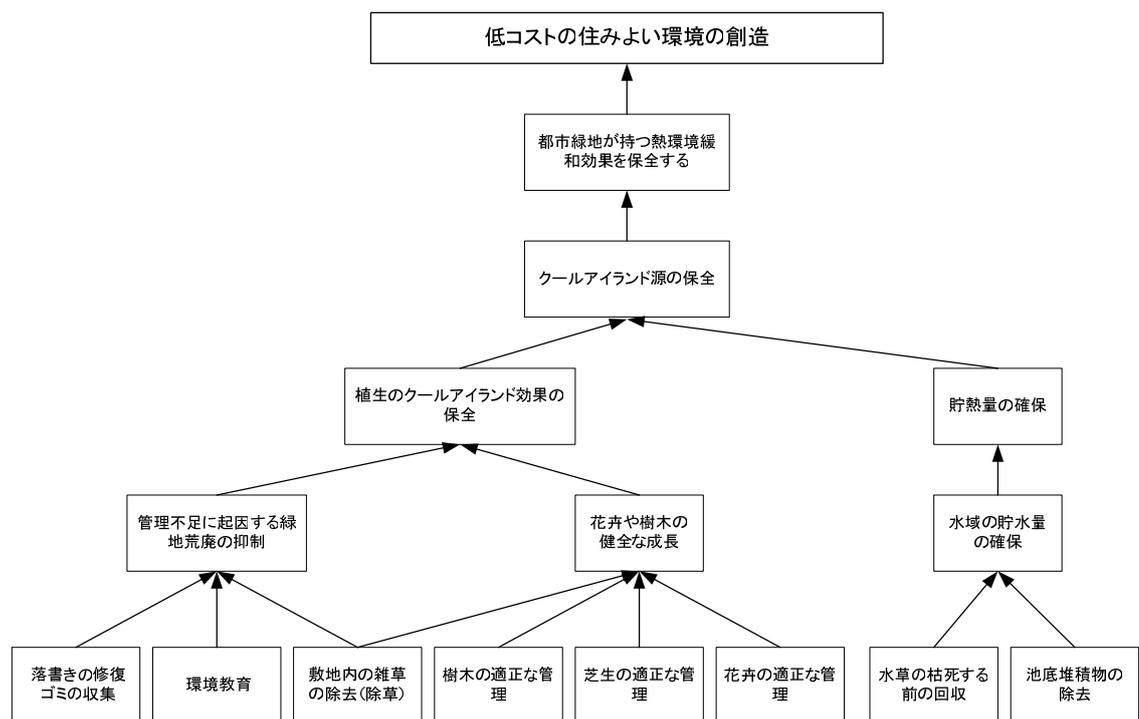


図 9.2-1 クールアイランド効果を機能させる都市緑地の環境管理手法（ロジック・フロー）

9.2.2 都市緑地の環境維持管理の内容

クールアイランド効果に配慮した環境維持管理項目の具体的な内容を以下に示す。

(1) 花卉や樹木の健全な成長

● 樹木の適正な管理

樹木には適切な林分密度があり、樹木の健全な生育は樹木がもつクールアイランド効果を高めている。樹木管理に当たっては、樹林地の担う機能を明確にし、それに適合する樹林地の形態（林分密度、植生、林相、遷移段階など）はどうかという樹木管理の方針を定め、そのための長期的スケジュール及び短期的スケジュールを立て、それにも続いて管理していく。樹林管理の作業内容は、下草刈り、枝払い、除伐・間伐、病虫害防除、施肥、補植、清掃などである。これらの維持管理を通して、樹林地が健全に生育しているかどうかを診断するために、林相や植生、健康状態などに関する調査を定期的に行う。

● 芝生の適正な管理

芝地のクールアイランド効果は樹木について大きく、都市緑地のクールアイランド効果を維持するためには芝地の適切な管理が必要である。芝地管理の内容は、刈り込み、施肥、目土入れ、除草、病虫害駆除、灌水、清掃などである。

● 花卉の適正な管理

花卉は、芝生と同様にクールアイランド効果が大きく、さらに観賞用として花卉が都市緑地内に分布していることで、利用者に対して環境に対する関心を高める効果をも有している。花卉類の管理の内容は、植え付けと管理に大別される。植え付けは、花卉材料の入手、整地、施肥、植栽、灌水を含み、植栽後の通常の管理は、灌水、施肥（追肥）、除草、病虫害駆除である。

(2) 水域の貯水量の確保

● 水草の枯死する前の回収

都市緑地内に水域がある場合、水域に分布している水草の適切な管理が水域のクールアイランド効果を持続させる鍵となる。水草は枯死すると腐敗物が池底に沈殿する。この際水界生態系の食物連鎖網が正常であれば、腐敗物は動物性プランクトンや貝類などに分解される。しかし、人工池や食物連鎖網が正常でない場合、腐敗物が池底に堆積し、池のクールアイランド効果を弱める原因となる。よって、枯死する前に水草を回収する。

● 池底堆積物の除去

池底は枯死した水草の堆積物のほか、ゴミや周辺からの土壌が流入している。これにより、池の水量は減少するだけでなく、悪臭を放ち景観を損ねるなどが問題となる。そこで、定期的に、池底堆積物を除去する。

(3) 管理作業のスケジュールの選定

管理作業は、植物の生理機構（萌芽、伸長、枯死）を十分認識して、それぞれの管理作業が植物の生理の型に反しないように実施する。なお、公園管理維持研究会は、植物管理の年間の標準スケジュールを表9.2-1のとおり定めている⁶⁾。

表 9.2-1 植物管理の年間の標準スケジュール⁶⁾

作業項目	内容	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
樹木手入れ	落葉樹剪定				軽剪定						基本剪定		
樹木手入れ	常緑樹剪定											基本剪定	
除草	草丈に応じて随時行う												
施肥	施肥を主体にして行う				芽出し肥	追肥						寒肥	
灌水	植栽後・樹勢の衰えた木												
病虫害駆除			アブラムシ・アメヒト								カガラムシ		
除草剤散布													
補植			常緑樹								落葉樹		
水草回収													

9.2.3 持続的な都市緑地の環境管理運営体制の検討

9.1節で示すように、米国における公園管理は、公園管理運営を担当するNPO、NPOの活動を統括する行政、行政とNPOの活動をチェックするとともに積極的に管理運営に参加する地域住民が結合して好循環に機能し、公園の管理運営をスムーズに行っている。これに対して、日本における公園管理の地域住民への委託の試みは、端緒についたばかりでありいまだ試行錯誤の段階である。その中で、米国のセントラルパークや東京都八王子市に位置する長池公園における取り組みは、今後のNPOによる公園管理のあり方を示す代表的な例として参考になる。本項では、持続的な都市緑地における環境管理の運営体制について検討した。

9.2.3.1 環境管理におけるNPO役割分担の検討

図9.2-2に、都市緑地の持続的・自立的な環境管理モデルのコンセプトを示す。本モデルは、行政、地域住民、NPOなどの多様な主体が、都市緑地のビジョンを共有し、計画、設計、施工などのプログラムに参加し、供用開始後はマネジメントに参画する三位一体型の環境マネジメント手法に基づいている。本モデルの特徴として、意思決定過程や結果は公開され、各種情報は共有化されるため、管理運営の全体像が明確になり、このプロジェクトにかかわっている関係者同士での情報共有が図りやすいメリットがあり、住民と行政がと

もに環境という問題を考えていく上で効率的な管理技術である。

具体的な各主体の役割分担について検討する。はじめに、NPO は、その名の通り非営利組織であるため、民間業者と比較して安価に業務の実施が可能である。NPO は、学識経験者だけでなく地域住民、行政側、民間企業など幅広い階層から構成されることにより、より広い視点からの企画立案が可能になるだけでなく、多様な意見やニーズに対応できるようになる。また、NPO は、地域住民、行政、民間企業の三者の中間に位置し、三者間の仲介役的な市民団体でもある。過去に、三者がばらばらに実施してきた環境問題や社会貢献活動などへの対応を統一化して、三者が対立の関係から、協調・協働の関係に移行できるよう調整する役割が求められる。一方、都市緑地は国民全体の公共財産である。よって、行政は責任を持って開発や許認可に関して審査を行うとともに、公園の主要な改善については、開発の各段階で行政の承認をおこなう。民間業者は、行政の発注により施設などのハード面の建設を担当するが、この場合でも、NPO は整備の各段階において行政側に適切なアドバイスを送る。

都市緑地の環境維持管理にかかる役割分担の視点	
<u>行政</u>	企画立案の審査、業務の発注、業務の検査
<u>民間企業</u>	施設などハード面の建設
<u>NPO (大学)</u>	環境管理の企画立案、業務管理
<u>地域住民</u>	公園利用や維持管理に関するプログラムの実施

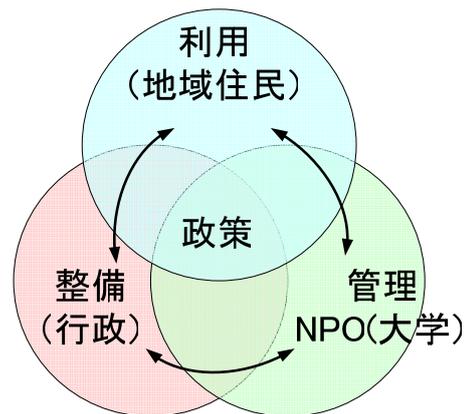


図 9.2-2 都市緑地の環境管理体制のコンセプト

9.2.3.2 NPO (大学) による都市緑地管理の活動内容

都市緑地管理における NPO (大学) の活動内容は、先進事例であるセントラルパーク管理委員会と同様に、日常的な公園管理と環境教育プログラムの提供の2点が基本である。しかし、都市緑地管理を NPO (大学) が効率的に実施していくうえで、地域住民との密接な関係を築くことは不可欠と考えられる。東京都八王子市の長池公園を管理する NPO 法人フュージョン長池は、長池公園周辺の住民の暮らし全般をカバーする「暮らしの支援事業」を実施することで、地域住民と NPO の距離を短縮させる試みを行っており、一定の成果をあげている。

このことから、都市緑地の環境管理を担当する NPO (大学) の業務内容として大きく以下の4点が考えられる (図 9.2-3)。

① 地域コミュニティ作業

一般に大都市に位置する都市緑地の周辺住民は、一戸建てが多く住居年齢層も比較的若いことから昼間人口が少ない特徴を持っている。よって、窓口や事務管理の代行サービスなど窓口業務やイベントの企画立案などの地域活動を行う。

② 日常的な公園管理

主に公園の日常管理（遊歩道の除草、街路樹の枝打ち、灌木及び花卉の手入れ、落書きの修復など）を行う。

③ 環境教育プログラムの開発及び提供

都市緑地の環境資産を利用して、環境・生態系の教育プログラム及び若者、家族、コミュニティ、学校向けのレクリエーション・プログラムを提供する。

④ 環境保護関連図書の出版

都市緑地に生息する生物を紹介した書籍や都市緑地の生態系などの書籍を出版する。

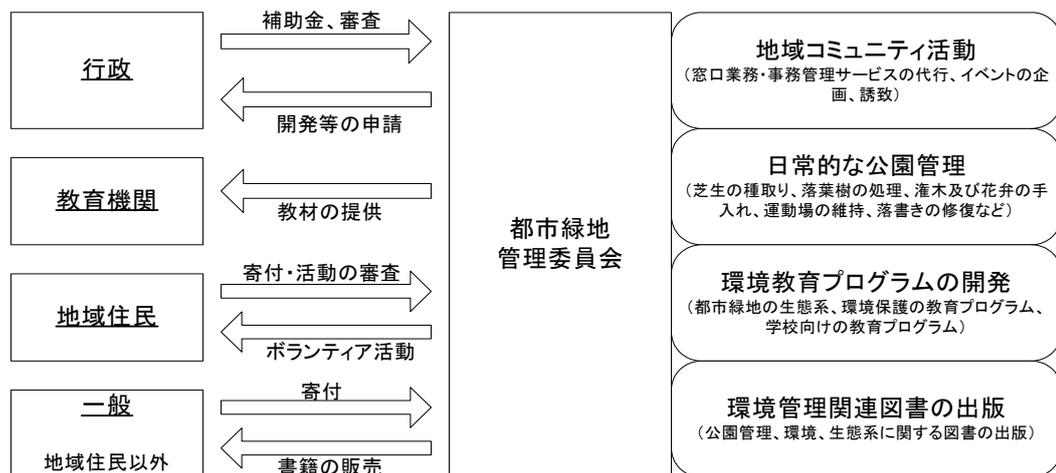


図 9.2-3 NPO(都市緑地管理委員会)の業務内容

9.2.4 都市緑地の持続的な環境管理と環境教育の方向性

都市緑地を健全で美しい状態のまま次世代に引き継ぐためには、適切な維持管理を継続的に実施するだけでなく、環境教育に対する配慮が必要である。

都道府県の教育委員会は個別に環境教育指針を定め、学校における環境学習として以下に示す取り組みを行っている。

- ① 子どもたちに、環境を大切にする心や、環境を保全し、よりよい環境を創造していかうとする実践的な態度を育成する
- ② 小学校・中学校・高等学校の環境教育の推進を図るため、環境教育の基本的な構想を策定するとともに、環境教育のための副読本の作成や系統的な環境教育を通

して、環境問題についての理解を深め、環境保全のために行動できる人づくりを進める。

この指針に基づき、小学生の授業の中に“環境”を積極的に学ぶ場を取り入れている。この環境学習のプログラムの開発には NPO や公園管理団体の力が必要である。環境教育を効率的に実施するためには、授業のプログラムや課外活動を対象に、少人数から学校単位の利用までを考慮し、対象年齢別、時間別、季節別など利用者の要望に応じて教材を選べるようにする必要がある。内容は、対象者が子供の場合はゲームなどを取り入れて、楽しく遊びながら自然や歴史を発見し、理解を深め、自然や環境に対する知識を身につくようにすることが必要となろう。

自然教育をもっとも効果的に実施する場所は、現地という教材に勝るものはない。たとえば、木曾三川公園ではパークセンターを設置し、公園管理を請け負っている NPO の活動拠点となっているだけでなく、展示や交流の場となる「交流サロン」や環境教育の拠点となる「環境学習センター」を設置し、利用者に環境について考える場を提供している⁴⁾。

また、小河原(1998)によると、公園緑地等の社会教育の場における環境プログラムの目標段階は表 9.2-2 に示すように学習者（利用者）の要求度に応じて4段階に区分され、関心度のフェーズに応じたプログラムが必要とされる⁷⁾。東京都大田区に位置する東京港野鳥公園の施設もこのフェーズに基づいて配置されている。たとえば、フェーズ I の家族連れやグループは、都市公園を散策することで、都市公園にどのような生物が生きているのかを理解させ、関心が高くなったフェーズ II の人達には、観察小屋で野鳥や湖面の状態を把握させるなど、学習者の要求度に合わせた施設配置も必要になる。

表 9.2-2 学習者の要求度とプログラムの目標⁷⁾

学習者相	学習者の要求度	プログラムの目標	学習領域
フェーズI 学習者の65%	自然への興味は少なく楽しい体験を求める	興味を持ち出し関心を高める I→II	完成学習 情意的領域
フェーズII 学習者の30%	自然に興味・関心を持ち、知識を求める	正確な知識に基づき、理解を深める II→III	知識学習 認知的領域
フェーズIII 学習者の4%	自然の知識をもち評価能力を求める	態度・技能、評価能力を育てる III→IV	価値学習 価値的領域
フェーズIV 学習者の1%	評価能力を持ち、活動への参加を求める	主体的・持続的な活動を援助する IV→	参加学習 行動的領域

9.3 クールアイランド効果に配慮した石土池の持続的・自立的な都市緑地管理 モデルの提案

石土池は、周辺の十市パークタウンの雨水流出制御を目的として1991年に設置された雨水調整池であるが、多様な生態系を有し、周辺住民の憩いの場となっている。夏季には水面の3割はハス、ホテイアオイ、ヒシなどの多様な水草で覆われており、水上の樹林地のように水面のクールアイランド効果を増加させている。

本論では、石土池のクールアイランド効果を定量化したが、石土池の持つクールアイランドポテンシャルは境界層を100mと仮定した場合、12時時点で十市パークタウン全体(56ha)最大2.06℃低下させるポテンシャルを有しており、十市パークタウンを取り囲むように分布する樹林地とともに、夏季のパークタウンの気温を低下させクーラー等の冷房機器の使用時間を低減させるクールアイランド効果があると考えられ、石土池の水界植生は地域の熱環境の側面からも保全すべき対象である。しかし、10年ほど前から、石土池はホテイアオイなどの外来種が進入し始めた。ホテイアオイは夏季に優れた水質浄化作用を有しているが、冬季に枯死して腐敗物が池底に沈殿しヘドロ化するため、池の水深が次第に浅くなっていく陸化問題が生じている。水深が浅くなると、雨水調整池としての洪水調整容量が減少して洪水調整効果が大きく損なわれ、同時に池の貯熱量が減少するだけでなく、陸化した場合潜熱フラックスの著しい減少が予想される。また、ホテイアオイに代表される外来種の進入は、石土池の洪水調節容量の減少や水質の悪化及び既存生態系の破壊を招いている。よって、石土池の環境管理計画を治水・水質・生態系のみならず熱環境の視点を組み入れてPCM手法を適用して総合的に検討した。

9.3.1 PCM手法の概要と実施手順

9.3.1.1 PCM手法の概要

PCM(プロジェクト・サイクル・マネジメント)手法とは、プロジェクトの計画立案・実施・評価という一連のサイクルを「プロジェクト・デザイン・マトリックス(PDM)」と呼ばれるプロジェクト概要表を用いて運営管理する一手法である(図9.3-1)⁸⁾。

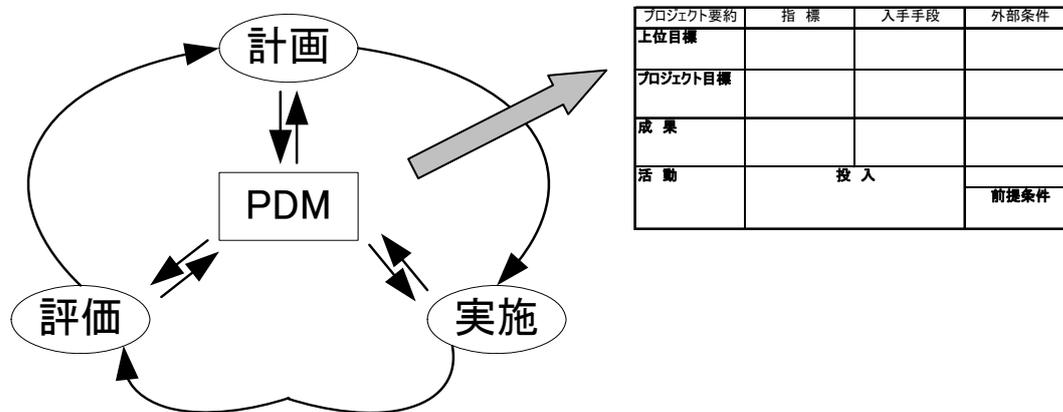


図9.3-1 PCM手法の概念図

PDMはプロジェクト計画を構成する目標、活動、投入等を含み、それらの論理的な相関関係を示している。PCM手法の特色として次のようなものがあげられる。

① 参加型

PCM手法で行われているワークショップ形式の協議においては、援助側、被援助側、プロジェクトの受益者など様々なグループの意見が平等に取り上げられ、関係者が計画作成に主体的に参加することが可能となる。

② 論理性

PDM作成にいたる分析過程では「原因-結果」、「手段-目的」等の関係に基づいて、状況が論理的に分析される。また、計画案であるPDMはプロジェクトの要素とそれらの関係を論理的に示される。

③ 一貫性

PDMを用いることによりプロジェクト・サイクルの全過程を一貫して運営管理することができる。

PCM手法によるプロジェクト立案手法には、的確で効率的なプロジェクト運営管理ができる、ニーズに応じた企画立案ができる、プロジェクト実施の透明性の確保が図れる、関係省庁や地域住民などプロジェクトに関与した関係者間のコミュニケーションが促進できるなどの利点があり、海外の援助計画を中心に適用され始めている。

9.3.1.2 PCM手法を適用した参加型計画手法策定の手順

PCM手法を適用した関係者参加型のプロジェクト計画立案の手順は、図9.3-2に示すように分析段階（関係者分析、問題分析、目的分析、プロジェクトの選択）と立案段階（プロジェクト選択、PDMの作成、活動計画表の作成）から構成される。



図 9.3-2 PCM 手法による参加型計画策定手順

9.3.2 検討対象地の現状分析

9.3.2.1 対象地の概要

十市パークタウンは、高知県南国市十市地区に 1983 年に造成が開始された比較的新しいニュータウンである。広さ 56ha、計画居住人口は 3,644 人であり、パークタウンの西部、北部、東部の 3 方向は小高い山に囲まれ、南部は広さ約 25ha の雨水調整地（石土池）が分布しているなど、周辺地域とは気候的に隔離された環境となっている。

十市パークタウンの治水計画の総事業費は 91 億円であり、そのうち 35.7 億円が石土池の整備費用となっている。池の北側には、十市パークタウンからの排水が流入している十市川が流れているが、一部堰堤が切断された地域があり、そこから十市川の雨水排水を石土池に流入させている。石土池の主な流入源は、この十市川からの雨水排水であるが、他の流入源としては、池への直接の降雨、池底からの湧水、隣接する山からの流入があげられる。

石土池の東側には農業用水のため池が位置している。これは、石土池南側に広がる農地用として整備しており、雨水排水が流入する石土池の水と混ざらないために、閉鎖性水域

となっている。農業用水地の流入源は、東部の山地からの湧水が主な流入源となっており、水質は良好である。石土池は、ハスやホテイアオイ等の水生植物が繁茂し、カメ、ブラックバス、ライギョが生息するとともに、冬季には水鳥が渡来しており、「水のある風景」は人々の憩いの場所として利用されている。しかし、「人々の憩いの場所」は別の側面を生み出している。石土池は高知およびその周辺では数少ない淡水池であるが、高知市民の釣りの名所となり、ブラックバス・ブルーギル等の外来性の肉食魚類による既往生態系の破壊や、心無い釣り客によるゴミの不法投棄が問題となっており、対策が望まれている。このように、十市パークタウンの生活環境を考えた場合、石土池は重要な役割を占めている。

9.3.2.2 石土池の水質特性

石土池を対象として、2002年4月から2004年2月まで2カ年にわたりCOD、BOD、T-N、T-Pの水質環境4項目について計測した。水質調査により、石土池の水質環境は以下に示す特性を持っている。

- ① CODはおおよそ $2\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ から $4.5\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ の計測値を推移している。冬季におけるホテイアオイの枯死による水質悪化要因の増加を考えると、石土池のCODは年間を通して良質な状態を維持している。
- ② BODは1年を通して、 $2\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ から $4\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ である。この数値は、アユの棲息限界と言われている $3\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ と比較して同程度及び限界以上である。
- ③ T-Pは、すべての観測時期で $1\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ を超えており、春季や夏季においては $3\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ と非常に高い結果となった。なお、T-Pは、1年を通して約 $0.05\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 程度である。

石土池における水質測定の結果、環境省が行っている指定湖沼の水質状況と比較すると、CODに関しては年平均で $3.15\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ であり上位4番目に位置する琵琶湖(南湖)、T-Nは年平均 $2.06\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ であり富栄養湖で有名な印旛沼、T-Pは年平均 $0.05\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ であり宍道湖・中海レベルとそれぞれほぼ同程度であることが示された(表9.3-1)⁹⁾。

平成14年の調査結果と比較すると、ホテイアオイの面積が平成14年度から平成15年度にかけて約33%増加したにもかかわらず、T-NやT-Pの観測地が逆に減少した結果となった(表9.3-2)。石土池が平成2年に従来のを拡張する際に、周辺の湿田を掘削した。一般に、湿田は高濃度にT-PやT-Nが集積しており、石土池においても過去に湿田であった地域から年月をかけてT-N、T-Pが少しずつ染み出していることが考えられる。これに対し、CODは平成14年度から平成15年度にかけて $0.26\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 水質が悪化した。環境保全に対する計画的な配慮がなされていない雨水調整池としては、良質な水質環境にある。しかし、石土池は、湖面のホテイアオイの面積が増加しており、ホテイアオイが冬季に枯死し池底にヘドロが堆積しつつあり、水質悪化の危険にさらされている。また、ホテイアオイの枯死によるヘドロの沈殿は、水質悪化の加速のみならず、池の水位を上昇させ雨水調整機能を阻害している。

表 9.3-1 全国の湖沼との水質の比較

	T-P (mg/L)	T-N (mg/L)	COD (mg/L)
野尻湖	0.005	0.12	1.80
釜房ダム貯水池	0.015	0.63	1.90
琵琶湖（北湖）	0.008	0.30	2.70
琵琶湖（南湖）	0.019	0.40	3.10
石土池	0.050	2.06	3.15
宍道湖	0.047	0.56	4.50
中海	0.063	0.61	5.00
諏訪湖	0.051	0.95	6.00
霞ヶ浦	0.110	0.99	8.10
児島湖	0.190	1.60	8.20
印旛沼	0.120	2.20	10.00
手賀沼	0.260	3.20	14.00

注：平成12年（石土池のみ平成15年）

全国湖沼資料集<第14集>より作成

表 9.3-2 石土池の水質（平成14年～平成15年）

	COD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
平成14年度調査	2.89	3.08	0.102
平成15年度調査	3.15	2.06	0.05

9.3.2.3 石土池の植生環境

石土池における植生環境の特徴としては、多様な植生で被覆されている夏季で見ると、池の南東部には湿地帯が広がっており、池の中部から南部にかけて広範囲にハスが密生している。また、十市川流入地点周辺には、十市川に多数分布しているホテイアオイが流入口より大量流入し密生している。ホテイアオイは風により流され池の北西部や北東部に移動している。石土池で確認される植物としては、浮葉性の植物としてハス、ヒシ、絶滅危惧種とされるガガブタ等が確認された。また、浮遊性のものはホテイアオイ、ウキクサが、沈水性の植物としては、オオカナダモ、クロモ、マツモ、エビモなどが確認された。2003年8月の各被覆の池全体に占める面積率は、ハスが34%、ホテイアオイが8%、ヒシ・ガガブタ群が27%を占めており、植生のない水面は24.5%であった（表9.3-3）。

表 9.3-3 石土池の植生被覆面積（2003年）

湖面被覆	被覆面積 (ha)					
	4月23日	6月22日	8月21日	10月31日	12月9日	2月11日
ホテイアオイ	2.688	2.292	2.922	4.648	4.682	3.711
ハス	4.784	6.988	8.049	5.275	2.464	4.240
ヒシ+ガガブタ		4.677	6.454	5.371		
湿地帯	0.489	0.565	0.477	0.527	0.379	0.490
水面	15.757	9.196	5.816	7.897	16.193	15.276
石土池 湖面面積合計	23.718					

※ 灰色は枯死したもの

9.3.3 クールアイランド保全の視点から見た石土池の水界生態系環境の問題点分析

9.3.2 項で示した石土池の現状から、クールアイランド保全の視点から現在石土池が抱えている問題点を抽出した。現状の石土池の環境に関する課題を以下に示す。

- ① 夏季にクールアイランド効果を有し、さらに水質浄化能力をも併せ持つホテイアオイは冬季になると枯死して腐敗沈殿し、富栄養化した池の水環境により夏には増殖する悪循環を繰り返す。これにより、石土池の水質が悪化するのみならず、沈殿した腐敗物（ヘドロ）により石土池の水深が年々浅くなり、石土池の設置当初の目的である雨水調整機能が満たされなくなる。
- ② 石土池では夏季においてはハスの花が咲き乱れる美しい景観を呈しており、高知県の各地からハスを見学する客が多数訪れているが、一部の心無い訪問者がゴミを不注意に投棄し景観を損ねている。また、現在、石土池の周辺は、近年の十市パークタウン整備により宅地の造成や交通量が増大し急激に都市化している。公共下水道は整備されているものの、地域からの生活雑排水のごく一部が石土池に混入し、石土池の水質環境が一部悪化の傾向を示している。水質悪化が進むと、地域住民と石土池との心理的な距離が離れ、池の水界植生の密度管理や池周辺の植物の生育管理がゆきとどかなくなり、池及び植物が持つクールアイランド効果を十分に発揮させることができない。

上記①,②より、問題の所在は大きく分けて水質環境の汚染と水辺空間の悪化に区別することができ、大局的に水辺環境の悪化が石土池の熱環境保全における中心問題とすることができる。そこで、“石土池の水辺環境が悪化している”を中心問題に据えて、①,②の各問題を「原因-結果」の関連で整理し体系化し、問題分析の関係図を図 9.3-3 に示した。

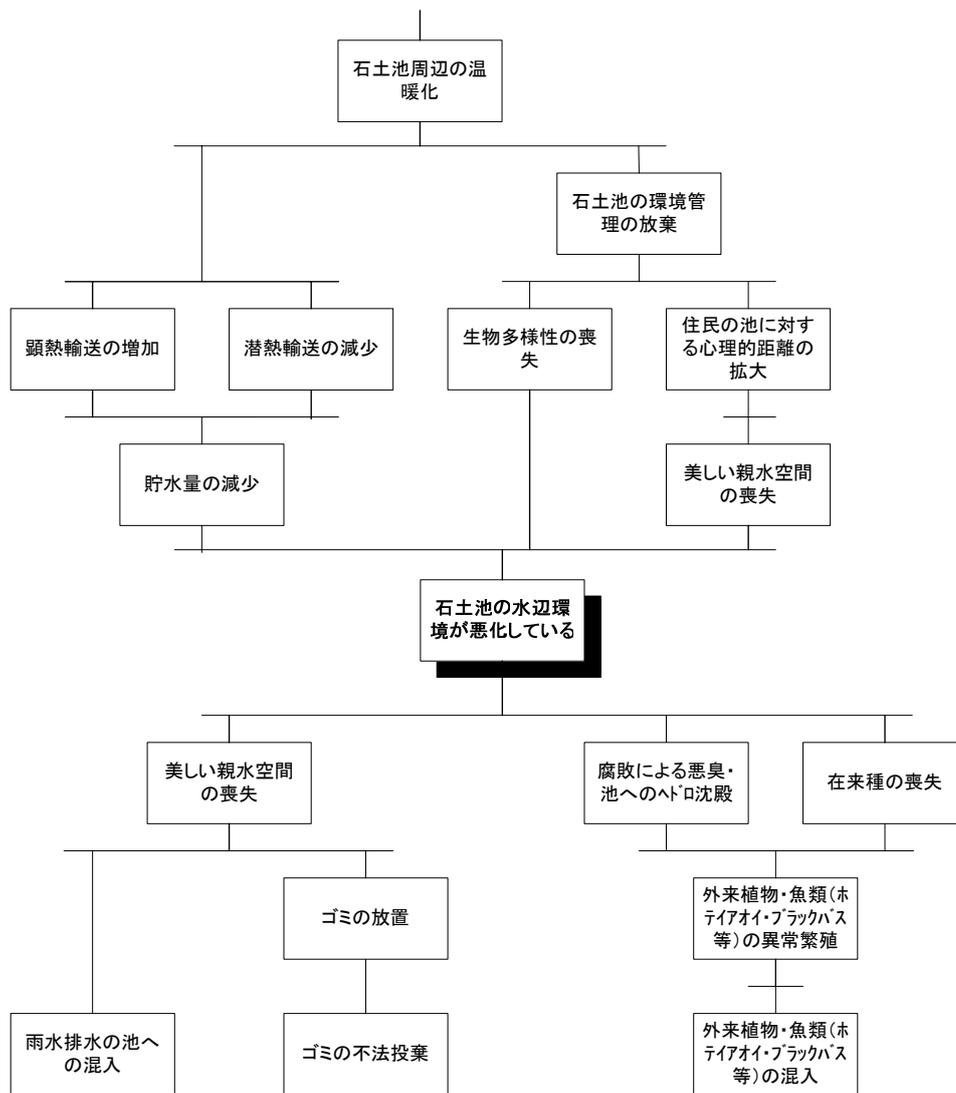


図 9.3-3 クールアイランド保全の視点からの石土池の水界生態系環境の問題点分析
(ロジック・フロー)

9.3.4 石土池のクールアイランド効果を復元・保全するための目的分析

石土池の置かれている現状を見ると、宅地の造成や交通量が增大した反面、適切な池の管理がなされていなかったため、ゴミの不法な投棄や雑排水の流入、外来生物の投棄が継続的に行われ、これにより石土池の水質悪化や生態系の変化や異変という問題が発生している。これにより、この問題が表面化することにより地域住民はますます石土池から距離を置くようになり、さらに問題が悪化するという悪循環となっている。このことから、この流れを断ち切り、水辺環境を再生することにより、池が持つクールアイランド効果は次世代に渡り維持されると考えられる。さらに、第5章で示したとおり、ハスやホテイアオイ・ヒシ・ガガブタなど水生植生が繁茂している水面の昼の12時の潜熱フラックスは、植生のない水面と比較して3倍程度大きくなっており、現状の石土池の多様な植生はクールアイランド効果をより高めている。このことから、石土池のクールアイランド効果の保全の視点から見ると、現状の多様な植生を維持していくことには意味がある。しかし、問題点分析で論じたように、ホテイアオイは冬季に枯死し、その腐敗物が池底に沈殿するため、雨水調整機能などの公益的機能を阻害している欠点がある。

以上の視点から、石土池の水界生態系環境を改善するための手段をPCM手法の目的分析により検討した。目的分析における中心目的は、問題点分析における中心問題の反転である“石土池の水辺環境が良好になる”と設定した。水辺環境が良好になる場合の手段の検討に当たっては、問題分析で抽出した水質環境の汚染、水辺空間の悪化を解決する手段を分析し手段を抽出した。

(1) 水質環境の悪化の改善手段

問題点分析により、石土池の水質が悪化している原因は、ホテイアオイの枯死による水界生態系の悪化にある。そこで、本項目の対策は、水界生態系再生対策について実施する必要がある。

水界生態系再生対策は、沈水性水草を用いた水質浄化手法に準拠して、良好な水質を保つ水界生態系の創出を目的として実施する¹⁰⁾。具体的な検討項目は、現在の水質環境を悪化させる原因となっているホテイアオイの除去、景観やT-P、T-N固定に役立つハスの植栽、植物性プランクトンを捕食する動物性プランクトンの生息場を提供する沈水性水草の導入の3点である。小島(2002)が福岡県太宰府市の松川ダムを対象としたアオコ抑制実験によると、湖面の30%をビニール製の特殊シートで被覆した場合にアオコの繁殖が抑えられた報告例がある¹¹⁾。そこで、ハスやヒシ類による湖面被覆は全体の30%を確保することを目標とする。図9.3-4に水質浄化手法の概念、図9.3-5にハス、ヒシの植栽エリアを示し、以下に検討項目の詳細を示す。

① ホテイアオイの除去

ホテイアオイは冬季に腐敗・沈殿するため、景観・水質保全上、完全に除去する。採取したホテイアオイは粉碎して肥料とするか、飼料用として再利用することが望まれる。

② ハスやヒシ・ガガブタの植栽面積の保全

次に、ホテイアオイを除去した池に対して、現状のハスやヒシ・ガガブタの被覆を保全する。ハスは、春から夏にかけて生長していく過程で栄養源となる窒素とリンを吸収し、根と葉茎において固定するため、水中の富栄養化を抑制している。秋から冬にかけて枯れはじめると水面上まで伸びていた葉茎は、池底に沈殿物として堆積し、ヘドロ化するが、根は、池底の土中で生長が止まった状態で越冬するため、枯死による腐敗で窒素とリンを水中に放出することはない。また、ハスは石土池の景観上、重要な役割を持っている。このハスの被覆面積を増加させる手段としては、鉢に植栽したハスの苗を池に沈めて植栽するが、生長には太陽光が必要であることから、水深の浅い水域から導入していく。ハスの管理手法としては、冬季に枯死する前に根と葉茎を適切に刈り取り、バイオマスを適切な量に維持していくことが必要である。

③ 沈水性植物の導入

沈水性植物は越冬することができる種もあるため、ホテイアオイのように冬季に枯れて腐敗沈殿しヘドロ化することがない。また、都市公園内の水辺環境の主軸になっている石土池でレジャー目的にボートを出す人たちが多数いるが、浮遊性のホテイアオイは航行の障害となる。沈水性の水草も航行に支障を及ぼすが、景観的には望ましい。導入手法としては、ホテイアオイが除去された後、石土池の水深の浅い湧水地区から深い部分に向けて沈水性水草を移植していく。

(2) 水辺空間の汚染を解決手段

現在、石土池の環境資源の一つとして美しいハスを主体とした景観に注目したい。しかし、問題点分析により、現状はゴミの不法投棄によりこの景観が損なわれている。そこで、本項目の対策は、石土池の環境資源であるハスを主体とした景観の維持と景観を損ねているゴミ不法投棄対策の2つについて同時に実施する必要がある。

- ① ハスを主体とした景観の維持に関する対策は、適切なハス群の生長と生息密度を確保することを目的として実施する。具体的な作業項目は、一般的な管理項目である街路樹の枝打ちや遊歩道の草刈りが含まれる。
- ② ゴミ不法投棄対策としては、石土池で発生するゴミの減量化を目的として実施する。具体的には、石土池におけるゴミの収集スペースの確保のほか利用客のゴミ減量化に関する意識の向上が含まれる。

図 9.3-6 に、石土池の水界生態系環境改善のための目的分析の体系図を示す。

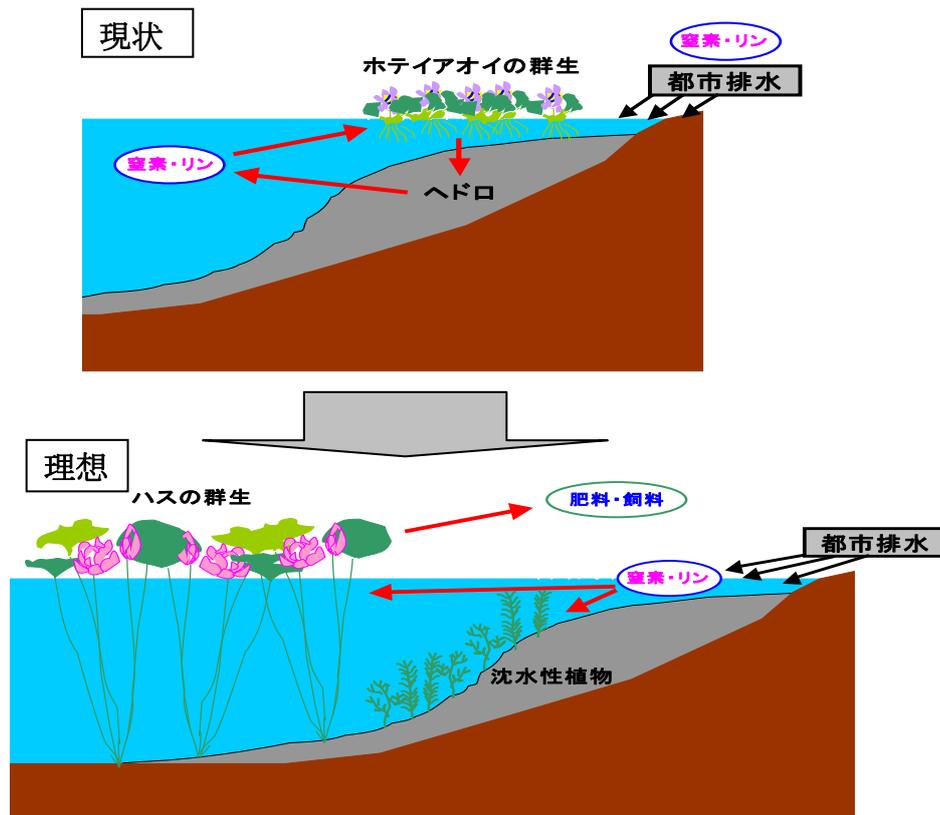


図 9.3-4 石土池の水界生態系改善手段の概念図

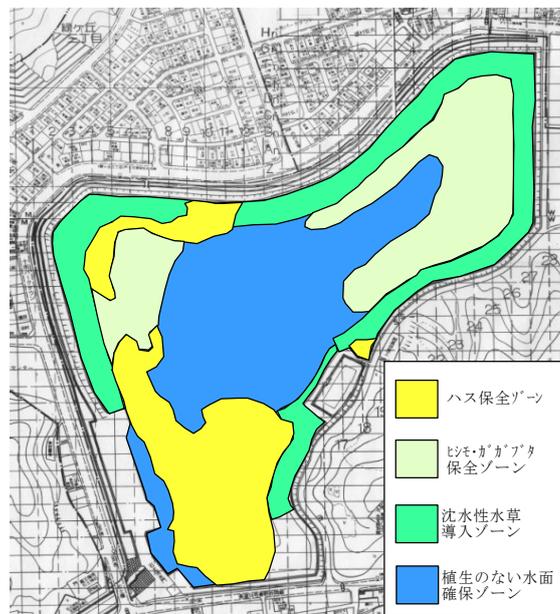


図 9.3-5 水質環境改善のための植生配置計画

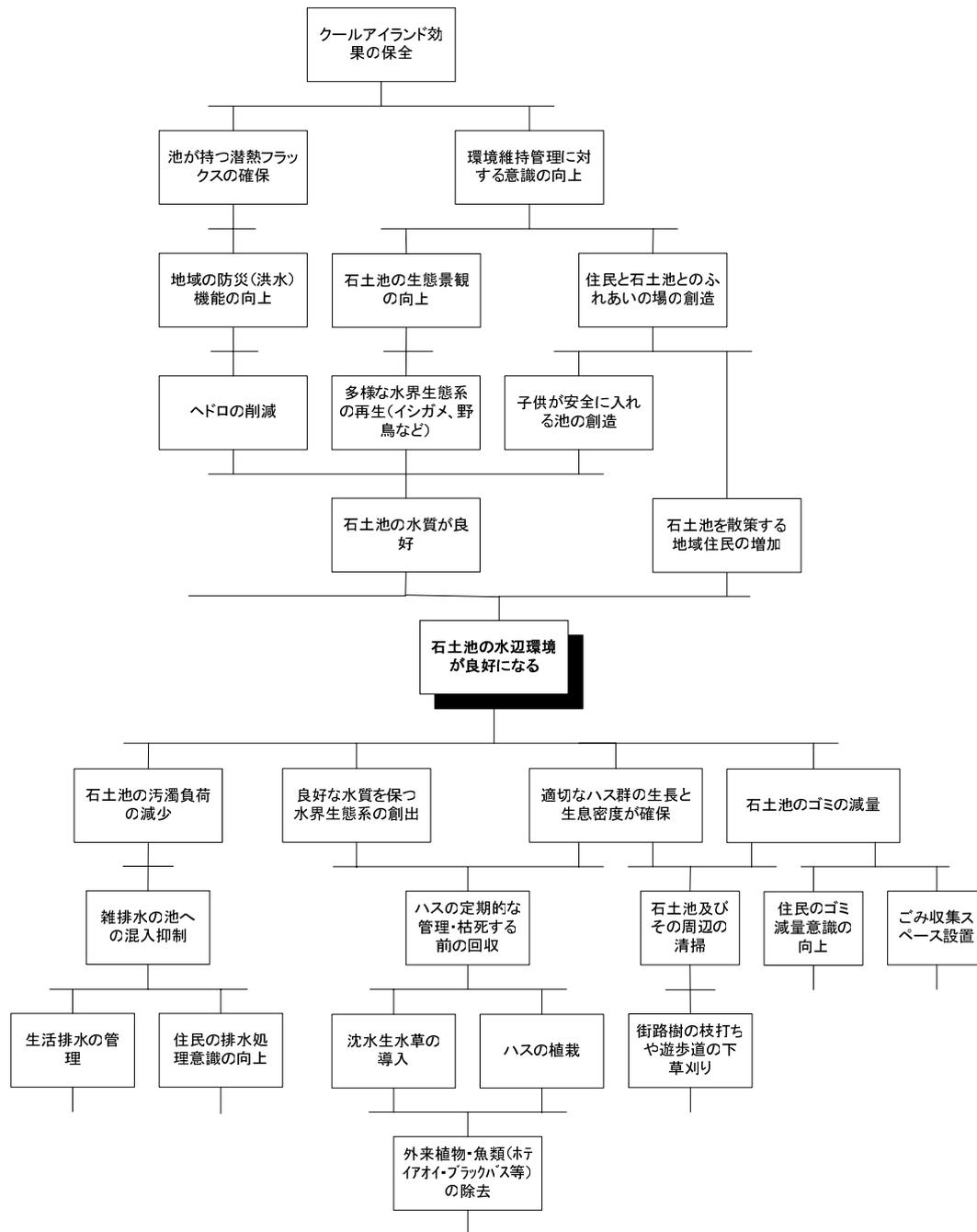


図 9.3-6 クールアイランド効果保全の視点から見た石土池の水界生態系環境の目的分析の体系図（ロジック・フロー）

9.3.5 水辺環境の改善アプローチの抽出及びPDMの作成

図9.3-6の目的体系図を見ると、いくつかの「手段-目的」の枝葉がグループを形成し、関連するプロジェクトの候補となっている。石土池のクールアイランド効果を復元するためのアプローチは、以下に示す5つから構成される（図9.3-7）。なお、本検討段階では、処理施設の設置などのハード対策は対象外とし、水質浄化・生態系保護アプローチ、景観保護アプローチの2点について、PDMを考慮した分析を行った（図9.3-8～図9.3-9）。

① 雑排水対策アプローチ

生活雑排水の直接河川への混入を防止し石土池の汚濁負荷を減少させることを目的とした対策であり、雨水側溝に不注意に混入させない意識対策を主体とする。

② 水質浄化・生態系保護アプローチ

生態系操作により石土池の水質を良好に保つ水界生態系創出を目的として、ホテイアオイやブラックバス・ブルーギルなどの外来生物を除去し、沈水性水草を植栽するなどの対策及び定期的な水界生態系保全のための管理作業を行う。

③ 景観保護アプローチ

石土池の美しい景観を維持させることを目的として、ハス群の生長と生息密度を維持確保や石土池周辺のゴミの定期的収集などの石土池の具体的な環境管理作業を行う。

④ ゴミ処理対策アプローチ

石土池のゴミの減量化を目的として、ごみ収集スペースの設置などのハード対策を行う。

⑤ 環境教育アプローチ

石土池の景観を持続させるための環境教育を継続的に実施する。

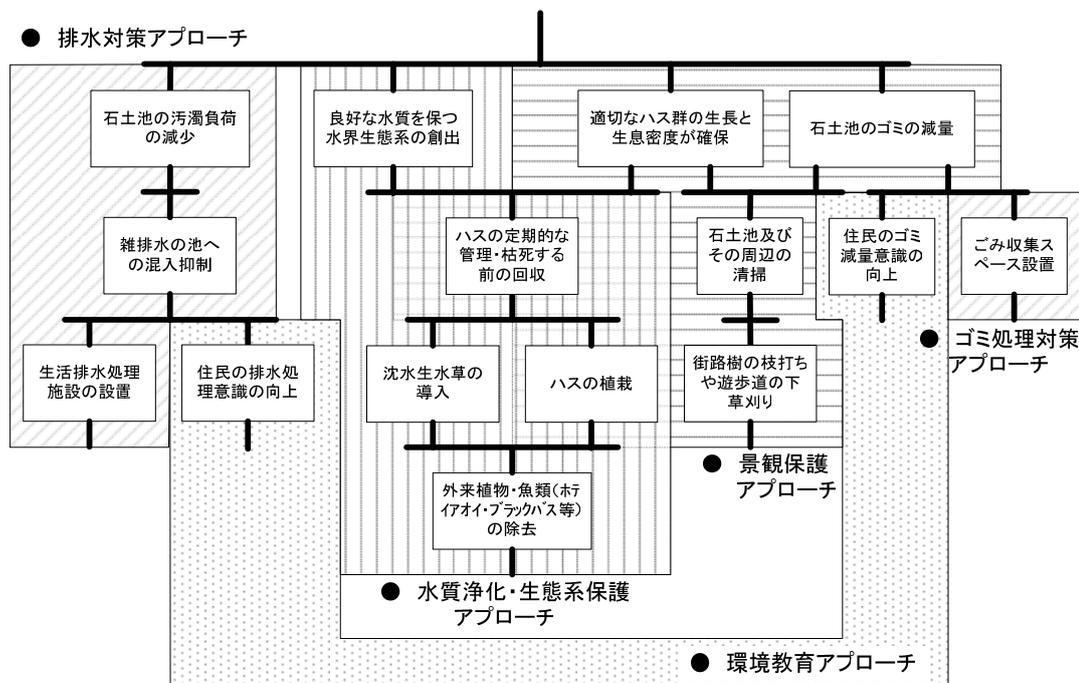


図9.3-7 石土池の水界生態環境の改善アプローチの体系図（ロジック・フロー）

PDM(案)

プロジェクト名：石土池水質浄化生態系保全プロジェクト（仮称）

Ver.No.: 1.0

対象地域：高知県南国市十市パークタウン

作成日：2005/01/12

スーパーゴール：石土池のクールアイランド効果を保全する

ターゲット・グループ：十市パークタウン住民

プロジェクト要約	指 標	入手手段	外部条件
上位目標 1. 子供が安全に入れる池 (事業終了後に達成が期待される目標)	石土池で泳いでいる子供の数	現地調査	持続的な生態系の管理を実施する
プロジェクト目標 ・石土池の水辺環境が良好になる (石土池の水質が改善する)	・プロジェクト実施後30年後に、石土池CODが琵琶湖北湖程度に減少する(アユがすめる生息限界：5ppm) ・プロジェクト実施後30年後に、石土池の透視度が2m以上	透明度調査	石土池に新規に外来植物・魚類を導入しない(在来種)
成 果 1. 良好な水質を持つ水界生態系の創出	・プロジェクト終了時点で、ハスやヒシモ・ガガブタの植栽面積が池全体の30%以上	湖面被覆調査	急激な気象条件の変化が発生しない 台風や大規模降雨など気象災害が発生しない
活 動 1. 外来植物・魚類(ホテイアオイ・ブラックバス等)の除去 2. ハス・沈水性水草の導入	投 入 (プロジェクト分担割合) NPO: 企画立案100%、プロジェクト管理100%、維持管理80~90% 施工業者: 施工100%、維持管理10~20%		十市川からの雨水排水が直接池に流入しない 前提条件 ・高知県から、NPO、施工業者へ業務発注 ・雨水調整機能を維持する

図 9.3-8 プロジェクト・デザイン・マトリックス (水質浄化・生態系保全プロジェクト)

PDM(案)

プロジェクト名：石土池景観保全プロジェクト（仮称）
対象地域：高知県南国市十市パークタウン
スーパーゴール：石土池のクールアイランド効果を保全する

Ver.No.: 1.0
作成日：2005/01/12

ターゲット・グループ：十市パークタウン住民

プロジェクト要約	指 標	入手手段	外部条件
上位目標 ゴミを捨てたくなくなる ような景観と清潔度を 保つ (事業終了後に達成が 期待される目標)	住民の石土池に対する満足 度	石土池住民アンケート結果	定期的に清掃活動、管理作 業を実施する
プロジェクト目標 ・石土池の水辺環境が 良好になる (ハスの生育環境(水質・ 生態系)を保全する)	・プロジェクト実施後30年後 に、石土池CODが琵琶湖北 湖程度に減少する(アユが すめる生息限界:5ppm)	水質調査結果	石土池に新規に外来植物を 導入しない
成 果 1. 石土池のゴミが減量 する 2. 適切なハス群の生長 と生息密度が確保される	1.プロジェクト終了●年まで に、石土池のゴミ(空き缶、空 き瓶)の搬出量を○%削減す る 2.プロジェクト終了●年まで に、ハスの植栽面積が池全体 の現状の34%を保全する	1.ゴミ搬出調査結果 2.湖面被覆調査	釣客や外部からの来訪者が ゴミを投棄しない 台風や大規模降雨など気象 災害が発生しない
活 動 1. ホテイアオイの除去 2. 石土池周辺の親水 空間の清掃 3. 街路樹の枝打ちや遊 歩道の下草刈り 4. ヒシモ・ハス群の定 期的な管理(間引きな ど) 5. ハス群が枯死する 前に茎や葉を刈り取る	投 入 NPO: 企画立案100%、プロジェクト管理100%、維持管理 90% 廃棄物処理業者: 維持管理10%		定期的に清掃活動、管理作 業を実施する 前提条件 ・高知県から、NPOへ管理業 務の委託 ・清掃作業時に発生する大型 ゴミは廃棄物処理業者に廃棄 を委託 ・雨水調整機能を維持する

図 9.3-9 プロジェクト・デザイン・マトリックス (景観保全プロジェクト)

9.3.6 石土池の水辺環境再生アプローチの審査

近年、行政運営を取り巻く財政環境は厳しさを増しており、より効果的で効率的な行政運営を実現するため、行政運営のやり方や仕組みを変革する取り組みにも関心が集まっている。また、住民の声が反映された行政運営を推進するという視点からも、行政の住民に対する説明責任(アカウントビリティ; *Accountability*)にも住民の関心が高まっているため、一つの取り組みとしてプロジェクト評価を実施する動きが広がってきている。プロジェクト評価を実施する際の評価の視点は、経済協力開発機構(OECD)の開発援助委員会(DAC)が提案した基準が一般に用いられている。DACの評価基準によると、プロジェクト評価は「妥当性」、「有効性(目標達成度)」、「効率性」、「インパクト」、「自立発展性」の5項目により行うこととしている。プロジェクト評価はプロジェクト・サイクルに沿って事前評価、中間評価、終了時評価、事後評価の4種類あるが、評価段階により評価基準の視点や重点の置き方が異なる¹²⁾。本論における石土池の水辺環境再生アプローチの評価は事前評価のレベルにあるため「妥当性」は現状の基づく検証、その他の評価項目は予測・見込みに基づく検証作業を行った。

妥当性

計画の妥当性とは、プロジェクトが目指していたものが計画時及び評価時のニーズに合致したものか、あるいは実施中のニーズの変化を捉えていたものであるかを見るものである。現在、石土池が抱えている環境問題である水辺環境の悪化は外来種(ブラックバス・ブルーギル)の異常繁殖による既存生態系を破壊し多様な生態系を喪失させるだけでなく、ホテイアオイが枯死・沈殿し堆積することによる雨水調整機能の阻害など様々な弊害を引き起こしており、早急な対策が望まれている。本論で提案した生態系を操作することによる水質浄化手法や景観維持手法は、これら問題の根本であるホテイアオイやブラックバス・ブルーギルをコントロールし石土池を多様な生態系を有する水質豊かな池へと再生することを目的として実施するものであり、これにより、石土池のクールアイランド効果を復元することである。よって、このプロジェクトの妥当性は高い。

有効性

計画の有効性とは、プロジェクトを実施することにより期待される成果が得られるかどうかについて評価するものである。本論で提示した水辺環境を再生させるアプローチは、バイオマニピュレーション(生態系操作)により水質浄化を行うアプローチである。バイオマニピュレーションとは、浅い水域での水界生態系の食物連鎖網システムの一部をコントロールすることによって、生物の多様性を保ちながら透明度が高く良好な水質環境を保全または創出する自然復元型の新しいコンセプトに基づいた応用生態系管理技術の一例であり、オランダのウォルダーウェイド(Wolderwijd)湖では、バイオマニピュレーションを適用した結果、生態系の上位に位置する魚類の種類をコントロールすることによって湖沼全体の生態系のバランスを保全して、良質な水質環境を創出している。プロジェクト実施

対象の石土池はオランダのウォルダールウェイド湖と比較して、問題発生の原点が異なっている違いはあるが、汚濁する前の澄んだ水質環境への生態系復元を目的とする方向性は同様である。本論で提案した水質浄化手法は、汚濁の根本原因となっているホテイアオイを物理的に除去し、生態系の上位に位置する魚類の種類をコントロールするとともに、石土池の在来の沈水性水草であるフサモを用いて石土池の過去の良好な水質を保っていた生態系に再生させようとするものである。本手法は、既往の適用事例からも水質浄化する上で有効であるだけでなく、多様な生態系が保全されるという点で有効である。

効率性

効率性とは、プロジェクト目標の達成度がコストと見合ったものかどうかを判定する基準である。本プロジェクトの目標は、水界生態系を良好にすることにより、クールアイランド効果や多様な生態系を保全することの他、地域のコミュニティの形成に役立つ。この環境資源が後世に残すことができれば、環境的な価値は大きいものと考えられる。さらに、フサモの植栽やハスの適切な管理を主体とする水質浄化法にかかるコストは、石土池の在来の沈水性水草を利用するため材料費はかからず、維持管理費用のみである。

インパクト

インパクトとは、プロジェクトの実施によりもたらされる長期的・間接的効果や波及効果を見る視点である。近年、地球環境への関心の高まりから、プロジェクト実施において周辺環境を激変させることなく、効率的・効果的な成果を上げる必要性が高まってきており、多自然工法などが注目を浴びてきている。一般に、多自然型の水質浄化手法は、微生物を用いる手法や新規に水生植物やシジミなどの貝類を導入する方法などが提案されている。本論で提案した手法は、石土池で過去に生息していた水草を用いて、過去と同様の良好な水質を保つ水界生態系を創出する試みであり、新規に生態系を再構築するものではない。このため、地域環境へのインパクトは少ないと考えられる。

自立発展性

自立発展性とは、プロジェクトの実施によって発生する成果・便益を、いかに活動終了後も持続されるかを評価するものである。過去における公園管理の問題点としては、公園管理を行政側が主体となって企画立案し、下請け業者が指示された作業をこなすだけの管理運営形態が多数見られた。これにより、地域住民にとって公園に対して親近感がなく、整備された公園がゴミや落書きが目立つようになり、これを削除するために立ち入り禁止区域を設定するなど悪循環となるケースが目立った。本論で提案した手法は、NPO（大学）が緑地管理の企画立案し、管理運営はNPO（大学）と地域住民が共同して行うシステムを提案した。これは、学識経験者のノウハウに地域住民の連帯が取り入れられ、地域住民の身近な緑地管理を行うことで、公園管理を自立的・持続的に行うことを主眼としている。

9.3.7 三位一体（地域住民、行政、NPO(大学)）による石土池管理運営フレームの予備的検討

本論では、NPO（大学）など公園管理団体が主体となり実施していくことを想定して石土池の環境管理運営のフレームを検討した。なお、管理運営計画を検討する場合、行政からの補助金の設定やNPO（大学）の収益を含めた経営を評価し総合的に判断して決定すべきであるが、本論では管理運営上の役割分担やその業務内容の管理運営計画フレームの検討にとどめている。

9.3.7.1 石土池周辺の住民活動の現状

国土交通省都市・地域整備局の施策の一つである多自然居住地域づくりのモデルとして、本来は雨水調整の目的である石土池に親水機能を加味させ新しい概念の雨水調整池として整備された。このため、石土池は多様な水界生態系を有するようになり、地域住民の自然に対する関心はニュータウン造成当初から高かった。十市パークタウンにおける環境保全の取り組みは、十市パークタウンの住民による自主的な石土池の清掃活動から始まった。現在は、この活動が母体である「石土池グラウンドワーク推進協機会」が中心となって、石土池の環境管理に取り組んでいる。石土池グラウンドワーク推進協機会は、地域住民と行政、企業が一体となり身近な環境の改善活動に取り組むグラウンドワークの手法による地域のシンボルである石土池周辺の里山の保全と地域の活性化を推進することを目的として、2000年10月に設立された環境管理団体である。団体は、学校関係者（幼稚園・小学校・PTA）、地域住民の代表（自治会）、各種団体、企業や行政関係者から構成され、定期的に石土池周辺の道路の下草刈りや清掃活動、自然に関する勉強会、リクリエーションの開催を行っている。また、近年、石土池周辺ではニュータウン造成により交通量が増加し、イシガメのロードキル問題が発生しているため、イシガメの生息域の確保に関する取り組みが地域住民の活動の関心課題となっている。

9.3.7.2 石土池の調整池管理の現状

高知県南国土木事務所は、ホテイアオイの枯死による環境悪化問題に対してホテイアオイ除去等の対策を平成11年度から実施している。平成11年度から現在に至るまでの除去費用は総計2,787万円であり、コスト縮減の方針から年々管理費用は減少してきている。なお、現在の石土池の諸管理は南国土木事務所が実施しているが、治水計画完了後には民間団体へ委託予定となっている

9.3.7.3 三位一体（地域住民、行政、NPO(大学)）による石土池管理運営フレーム

石土池の環境を維持管理していくための運営フレームを図9.3-10、石土池の環境維持管理における役割分担を表9.3-4に示す。運営フレームは、図9.2-2のコンセプトに従い、池の開発・管理にかかわる許認可と予算管理を行政側が、維持管理の具体的な企画・立案

及び環境維持管理や利用面に関する各種プログラムの実施を NPO と地域住民が主体となって担当するシステムで構成される。これにより、管理運営の全体像と役割及びミッションが明確になるだけでなく、このプロジェクトにかかわっている関係者同士での情報の共有が進み、システム的な環境管理能力の向上が期待できる。

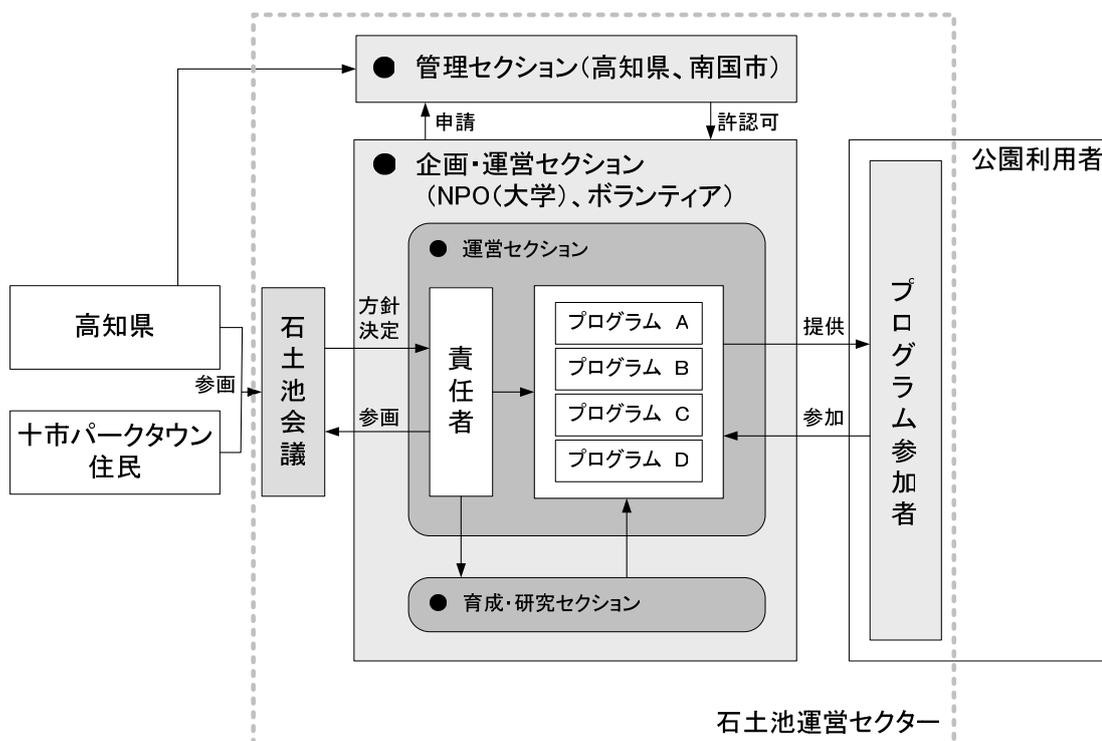


図 9.3-10 石土池の環境を維持管理していくための運営フレーム

表 9.3-4 石土池の環境維持管理における役割分担

アプローチ	目標	目標を実現するための管理項目	企画	実施	備考
排水対策アプローチ	石土池の汚濁負荷の減少	生活排水処理施設の設置	行政	民間企業	
在来種の生息域の確保	良好な水質を保つ水界生態系の創出	外来植物・魚類の除去	NPO (大学)	民間企業	業務発注。NPOはアドバイザー
		在来種の適切な管理	NPO (大学)	NPO (大学)	地元住民によるボランティア
景観保護アプローチ	親水空間の整備	雑排水の排出削減		地元住民	
		石土池及びその周辺の清掃	NPO (大学)	NPO (大学)	地元住民によるボランティア
		街路樹の枝打ち	NPO (大学)	NPO (大学)	地元住民によるボランティア
ゴミ処理対策	ゴミ減量化	遊歩道の下草刈り	NPO (大学)	NPO (大学)	地元住民によるボランティア
		ゴミ収集スペースの設置	行政	民間企業	
環境教育アプローチ	環境教育	ごみ減量化の意識向上	NPO (大学)	学校、NPO(大学)	
		排水処理意識向上	NPO (大学)	学校	

9.4 都市緑地の環境経営モデルの検討

現在、環境施策等の評価モデルは、環境経済学の分野において CVM やトラベルコスト法を用いた環境評価モデルが提案されているが、これらは環境効果を絶対値として評価するのが主流であり、住民が納得したコストを踏まえた評価とはなっていない。さらに、環境改善や都市計画を評価する際に、絶対値評価に対して住民の納得できる負担額は相対的であり、住民の支払い意思を反映させた評価とはなっていないのが現状である。よって、今後都市緑地の整備事業を実施するにあたって、地域住民が感じる価値に見合った事業の立案・維持管理運営とそれに対する説明責任を兼ね備えた“環境経営”のモデルの提示が必要である。

この視点で既往の研究事例を見てみると、環境経営が企業内で注目されているが、そこで定義されている意味は、企業が環境に対して何らかの対策を取るのではなく、経営方針そのものの中に積極的に環境問題を組みこむことを意味しており、環境そのものを経営資源あるいは経営対象として都市緑地整備から維持管理までを検討した事例はほとんどない。

そこで本論では、既存の環境経営概念とは異なった、環境という“資源”をもとにして、都市緑地が持つ効用を次世代に渡り維持管理していく“新しい環境経営”モデルとして、クールアイランドを効果的に機能させるとともに、都市緑地整備や維持管理コストと地域住民のニーズを両立させる都市緑地のあり方を導出する都市緑地運営モデルについて検討する。

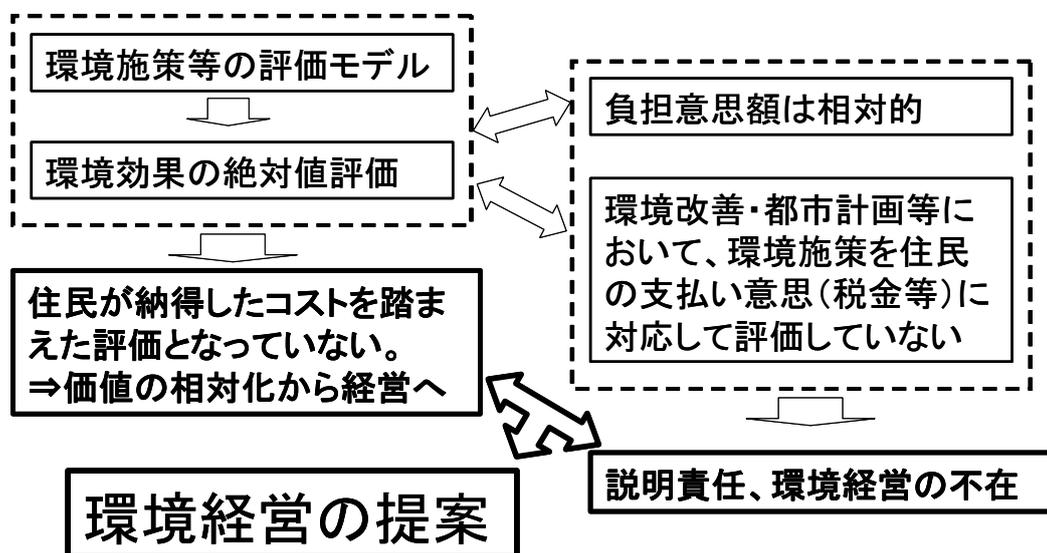


図 9.4-1 環境経営モデル提示の必要性

9.4.1 都市緑地の環境経営モデルの検討手順

都市緑地経営モデルの検討手順は、はじめに環境経営の前提条件として都市緑地整備における土地被覆の制限条件を公益的機能ごとに設定する。次に、経営主体が都市緑地を経営する場合、収入面と支出面のバランスにより経営分析を行うのが一般的である。そこで、収入面として住民が都市緑地を設置することによる気温低下に対する支払い意思額(WTP)とし、支出面として都市緑地の整備コストと管理コストの合計と設定し、土地被覆面積を指標として関数化する。最後に、都市緑地の環境経営モデルとして、NPOや地方自治体を想定して利潤を必要としない経営モデルと、一般企業を想定した利潤を必要とする経営モデルに分け分析を行い、経営を成立させるための都市緑地整備のあり方について検討する(図9.4-2)。

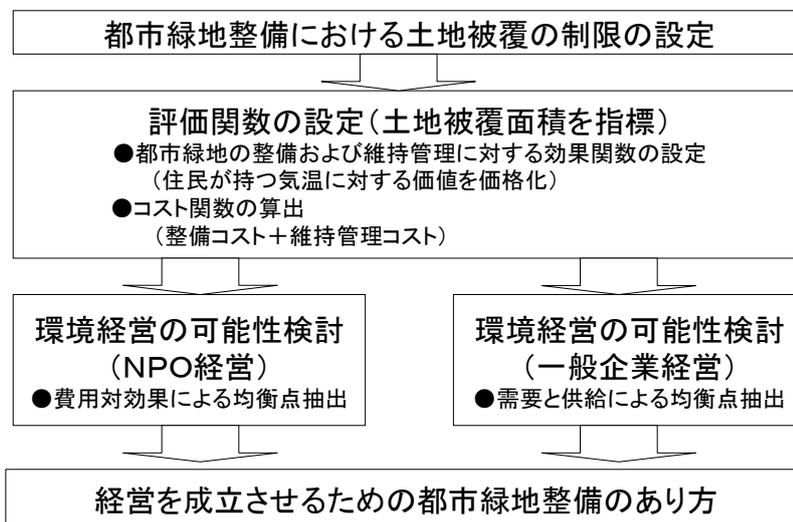


図9.4-2 都市緑地運営モデルの検討手順

9.4.2 クールアイランド保全の視点からの都市緑地の整備および維持管理に対する住民の支払い意思額(WTP)の推定

都市緑地を整備する側にとっての効用は整備することにより得られる収入であり、都市緑地の公益的機能を享受する地域住民から税金あるいは料金として得る。クールアイランド保全の視点から見た都市緑地に対する支払い意思額(WTP)の推定に当たっては、夏季の空調機を使用することによる電気料金に着目し、都市緑地を設置した場合に周辺の気温が低下することによる電気料金節約量を、都市緑地のクールアイランドに対するWTPと仮定し算定する。これは、住民が実際に得ることができる生活コスト削減額であり、厳密に住民の支払い意思額とは異なる。例えば、気温が十分に低い場合には住民はもっと低い支払い意思額を示すと考えられるからである。しかし、ここでは、仮にWTPとしても良いと仮定して話を進める。

(1) クールアイランド効果に対する WTP の推定法

図 9.4-3 に、クールアイランド効果に対する住民の効用の推定手順を示す。手順は、はじめに、AMeDAS 気象観測データを用いて検討対象地域の夏季の平均的な毎時気温を算出し、室内伝熱モデルを用いて冷房の設定温度ごとの冷房使用電気料金を推定する。次に、対象地域に都市緑地を設置した場合における気温低減ポテンシャルを式 (8-4) より推定し、都市緑地がある場合の冷房の設定温度ごとの冷房使用電気料金を推定する。さらに、両者の冷房使用電気料金の差をとることにより、都市緑地を設置した場合の冷房の設定温度ごと電気料金節約量が算出され、省エネルギーアンケートで回答者が選択した設定温度を考慮することで、住民一人当たりの電気料金節約量が推定できる。

(2) 算出に当たっての前提条件

① 室内伝熱モデル

都市緑地の設置による電気料金節約量の算出に用いる室内伝熱モデルとして、人間 1 人の一般的な空間として 8 畳 (3.52m×3.52m)、天井までの高さを 2.5m の南向きのコンクリート住宅で、窓の大きさは 1.8m×1.8m が 1 枚と仮定する。室内に入る熱量は、1) 屋根・天井から入る熱量、2) 外壁から入る熱量、3) 窓から入る太陽の輻射熱、4) 窓から入る温度差による熱量、5) 床から入る熱量の 5 項目。内部からの熱源として、6) 人体からの発熱量、7) 照明器具からの発熱量、8) 換気のための外気負荷。これら 8 項目の顕熱量を一般的な 12 畳用の空調機 (冷房能力 3.2kW) により熱を室外に移動させると仮定して、それに要する電気料金を算出した。なお、冷房の使用時間の算出に当たっては、現実の利用法を想定し、外気温が各個人の冷房設定温度より低下した場合冷房の使用を中断し外気を活用すると仮定した。図 9.4-4 に、本論で適用した室内伝熱モデルの概要を示す。

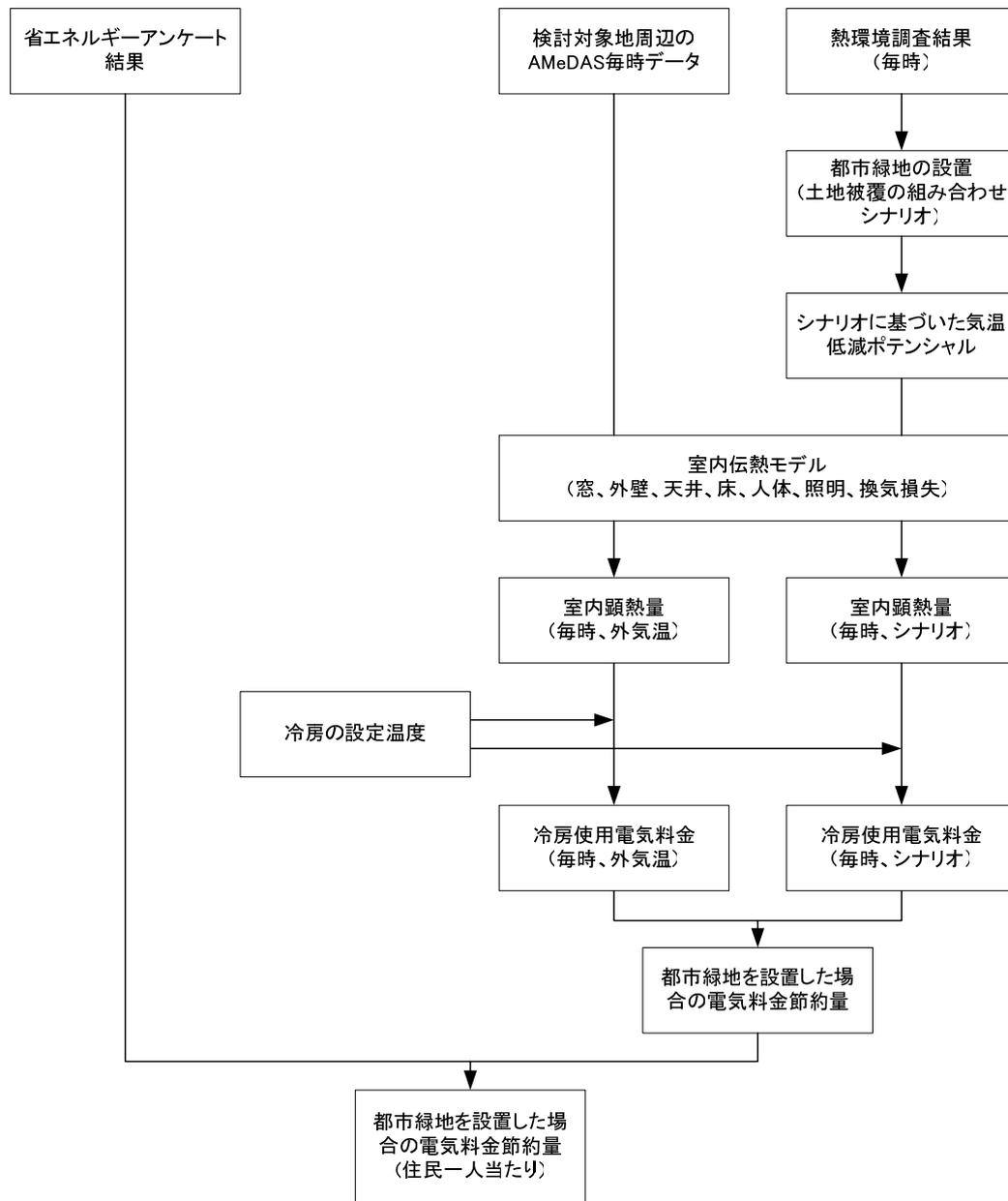


図 9. 4-3 クールアイランド効果に対する住民の支払い意思額 (WTP) の推定手順

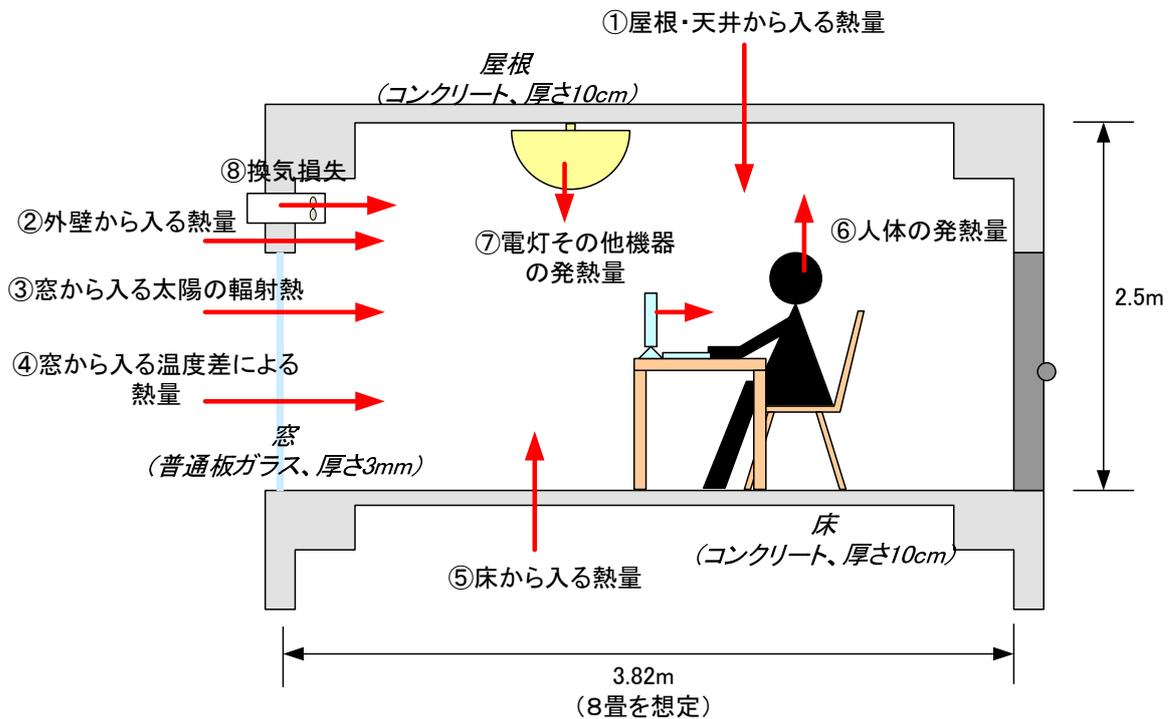


図 9. 4-4 室内伝熱モデルの概要

② 省エネルギーアンケート結果

個人の冷房時間設定に関するデータは、(財)省エネルギーセンターが実施している省エネルギーに関するアンケート結果(平成15年度)を適用した¹³⁾。表9.4-1に冷房設定温度とその回答率を示す。(財)省エネルギーセンターでは、平成9年度から春季と夏季の2時期に省エネルギーに関するアンケートを実施している。実施内容は、1) 政府広報「夏・冬季の省エネルギーについて」の要請に対する国内の工場・業務用ビルおよび一般家庭での認識状況、2) 国内の工場・業務用ビルおよび一般家庭で取り組まれている省エネ対策の実態、3) 政府広報や省エネ全般に関する意見、の3項目から構成されている。アンケート調査は、全国無作為に調査票を郵送、インターネットによって発送・回収しておこなったもので、春季は暖房に関する内容で1月上旬に発送し、2月中旬に回収、夏季は冷房に関する内容で8月末に発送し、9月末に回収、毎年2000程度の回答数である。この調査結果は今後の政府広報に反映すると同時に、日本の省エネルギー対策、そしてまた地球温暖化防止対策の検討のために貴重な資料として活用されている。本論ではこのアンケート結果のうち、四国地方(徳島、香川、愛媛、高知)に関する結果を取りまとめ、個人の冷房設定温度の基礎データとした。

表 9.4-1 冷房設定温度とその回答率 (N=75)

設定温度	百分率
29°C-	2.7
28°C	9.3
27°C	21.7
26°C	18.7
25°C	14.7
-24°C	21.3

(3) 都市緑地の設置による冷房使用料金削減量の推定

① 室内伝熱モデルによる顕熱量の推定

8 畳空間に人間が一人住居している場合の夏季の顕熱フラックスを推定する。室内伝熱モデルにおける個々の熱量の算定式を以下に示す。

外壁、天井、床からの熱量

外壁・天井・床から侵入する熱量の算定に当たっては、壁体が厚さ 10cm のコンクリートで構成されており壁体を構成する材質が均質であると仮定し、次式により算出する。

$$q_w = k \times A \times \Delta t_e \quad \dots \dots \dots (9-1)$$

ここで、 q_w ：熱量(kcal・hr⁻¹)、 k ：コンクリートの熱貫流率 (3.50kcal・m⁻²・hr⁻¹・°C⁻¹=一定¹⁴⁾)、 A ：侵入面積 (m²)、 Δt_e ：壁体両面の温度差 (°C)。

なお、壁体両面の温度差については、(株)YAMAHA による実測事例を参考に、以下のとおり設定した。

$$\text{天井：外気温} \times 1.56 - \text{冷房設定温度} \quad \dots \dots \dots (9-2)$$

$$\text{外壁：外気温} \times 1.406 - \text{冷房設定温度} \quad \dots \dots \dots (9-3)$$

$$\text{床：外気温} \times 1.25 - \text{冷房設定温度} \quad \dots \dots \dots (9-4)$$

ガラス面通過日射熱量

本項目は、ガラス面を通過して室内に侵入する日射熱量である。

$$q_{gr} = I_{gr} \times k_s \times A_{gr} \quad \dots \dots \dots (9-5)$$

ここで、 q_{gr} ：ガラス面通過日射熱量(kcal・hr⁻¹)、 I_{gr} ：ガラス面の日射熱量(kcal・m⁻²・hr⁻¹)、 k_s ：遮蔽係数 (0.62=一定)、 A_{gr} ：ガラス面積 (m²)

算出に当たっては、2004 年 9 月 2 日に石土池で観測した全天放射量を基本とし、家屋が北緯 33 度、東経 133 度に位置するものと仮定し、南向きのガラス窓から侵入するガラス面の日射熱量を計算した。また、一般的に、人は日射が入り室内が暑くなると、ブラインドを下ろしたりレースカーテンなどを使用し、直接的な日射を遮る工夫をする。そこで、遮蔽係数の設定の際には、日中すべてにブラインドを下ろすと仮定し、遮蔽係数 0.62 を適用した¹⁴⁾。

窓から入る温度差による熱量

ガラス面から侵入する熱量は前段の日射のほか、窓の内外の温度差に起因する移動熱量が挙げられる。本項目の算出に当たっては、ガラス材質を厚さ 3mm の普通板ガラスと仮定し、次式により算出した。

$$qgc = kgr \times Agr \times \Delta te \quad \dots \dots \dots (9-6)$$

ここで、qgc：熱量(kcal・hr⁻¹)、kgr：普通板ガラス面の熱貫流率 (5.7kcal・m⁻²・hr⁻¹・°C⁻¹ =一定¹⁴⁾)

人体からの発熱量

一般に、人間はエネルギーを食べ物という形で取得し、さまざまな新陳代謝を行い熱を体外に放出している。人体からの発熱量は、室内に着席している場合の潜熱と顕熱の既存の計測事例より設定し、次式により算出した¹⁴⁾。

$$qp = (qps + qpl) \times NP \quad \dots \dots \dots (9-7)$$

ここで、qp：人体からの発熱量(kcal・hr⁻¹)、qps：人体から発生する顕熱(53kcal・hr⁻¹・人⁻¹=一定)、qpl：人体から発生する潜熱(49 kcal・hr⁻¹・人⁻¹=一定)、NP：人数 (人)

照明器具からの発熱量

照明器具からの発熱量は、110W の白色灯 1 個により室内をカバーし、夕方 17:00 から 24:00 まで利用すると仮定して次式により算出した¹⁴⁾。

$$qe = 0.86 \times k \times W \quad \dots \dots \dots (9-8)$$

ここで、qe：照明器具からの発熱量(kcal・hr⁻¹)、k：熱変換効率 (白熱灯の場合は 1.0)、W：照明器具のワット数(W)

換気損失熱量

$$qv = \gamma \times V \times \Delta i \times (1 - \Delta e) \quad \dots \dots \dots (9-9)$$

ここで、qv：換気負荷 (kcal・hr⁻¹)、γ：空気の比重(kg・m⁻³)、V：必要換気量(m³)、Δi：室内外のエンタルピ差(kcal・kg⁻¹)、Δe：エンタルピ交換効率(0.6=一定)

以上の計算式で表される個々の熱量を総和することにより室内の総顕熱量が算出できる。

$$Q_{time} = \left(\sum qw + qgr + qgc + qp + qe + qv \right) \times conv \quad \dots \dots \dots (9-10)$$

ここで、Q_{time}：time 時間における室内総顕熱量(Wh)、conv：変換係数(1.16=一定)

② 室温を設定温度まで下げるための消費電力の推定

①で算出された室内の総顕熱量を冷房機器にて室外に排出されるのに要する消費電力量

は次式で示される。

$$Pow_{time} = \frac{Q_{time}}{Cool_Abi} \times Cool_pw \quad \dots \dots \dots (9-11)$$

ここで、 Pow_{time} : time 時間における冷房機器の消費電力量 (Wh)、 $Cool_Abi$: 冷房機器の冷房能力 (W)、 $Cool_pw$: 冷房機器の消費電力 (W) を表す。

式(9-11)の前項は冷房機器の使用時間を表す。なお、この際、外気温が空調機の設定温度以下に低下した場合、 $Pow_{time}=0$ である。

③ 設定温度ごとの日あたりの電気料金の推定

冷房機器の設定温度ごとの電気料金を算出する。

$$C_Pow_{def} = \sum Pow_{time} \times cost \quad \dots \dots \dots (9-12)$$

ここで、 C_Pow_{def} : 冷房機器の設定温度 def のときの電気料金(円)、 $cost$: 1kW あたりの電気料金 (25 円=一定) である。

④ 都市緑地を設置することによる WTP の推定

①～③までの計算式を用いて、AMeDAS から算出した外気温と都市緑地を設置した場合の外気温の冷房使用料金を2パターン算出する。次に、省エネルギーアンケート結果から得られた冷房機器の設定温度の設定率より外気温と都市緑地を設置した場合の期待値を算出し、その差をとることで都市緑地を存在することによる住民の冷房機器使用に電気料金削減量が算出できる。

この冷房使用料金削減量が、平均的な住民が持つ都市緑地のクールアイランド効果の視点から見た等価変分(ES)であり、住民がクールアイランド効果を維持するために支払う最大支払い意思額(WTP)と考えられる。

$$WTP = WTP_{norm} - WTP_{park} \quad \dots \dots \dots (9-13)$$

$$WTP_{norm, park} = \sum (C_Pow_{def} \times Per_{def})$$

ここで、 WTP : 都市緑地を設置することによる冷房使用料金削減量 (円)、 WTP_{norm} : 都市緑地が無い状態の冷房使用電気料金 (円)、 WTP_{park} : 都市緑地を設置した場合の冷房使用電気料金 (円)、 Per_{def} : アンケート結果による def 温度のときの選択率 (%)

9.4.3 クールアイランド効果を機能させるための環境コストの推定

都市緑地の環境コストは、次式で推定する。

$$\text{都市緑地の環境コスト} = \text{整備コスト} + \text{維持管理コスト} \quad \dots (9-14)$$

都市緑地の整備コストは8.1.3.2項で示したとおりである。次に、都市緑地の維持管理コストの算出を推定する。維持管理コストの算出に当たっては、樹林地と芝地、水面の3項目を維持するための管理項目を抽出し、NPOなどの公園管理団体が都市緑地の維持管理を担当することを想定して算定する。また、各管理項目の頻度は、9.2節で整理した管理項目ごとの標準スケジュールを参考に設定した。なお、(財)建設物価調査会による建設工事標準歩掛が提示している歩掛は、一般的に民間の利益を想定して算出しているため、NPOなどによる管理コストと比較して多少多めに提示している。そこで、各管理項目の標準歩掛の設定に当たっては、NPOなど公園管理団体が都市緑地の各管理項目について利益をほとんど無視して実施した場合の年間頻度と標準歩掛を表9.4-2に示すとおり想定し、環境管理コストを算定した。

● 芝地		
敷地内除草	.....	4回/年
芝生刈込	.....	4回/年
かん水	.....	10回/年
芝生施肥	.....	2回/年
● 樹林地		
樹林地下草刈り	.....	4回/年
除伐・つる切	.....	0.5回/年
かん水	.....	5回/年
樹木施肥	.....	2回/年

表9.4-2 各管理項目の標準歩掛

遊歩道除草				樹林地下草刈			
大項目	項目	数量	単位	大項目	項目	数量	単位
人件費	普通作業員	1.0	人	人件費	普通作業員	1.0	人

芝生刈込 (人力)				除伐・つる切			
大項目	項目	数量	単位	大項目	項目	数量	単位
人件費	普通作業員	0.5	人	人件費	普通作業員	1.0	人
電気料金など		2%	労務費の2%	電気料金など		5%	労務費の5%

かん水 (人力)				かん水 (人力)			
大項目	項目	数量	単位	大項目	項目	数量	単位
人件費	普通作業員	0.5	人	人件費	普通作業員	0.50	人
かん水量、電気料金など		2%	労務費の2%	かん水量、電気料金など		5%	労務費の5%

芝生施肥 (人力)				樹木施肥 (人力)			
大項目	項目	数量	単位	大項目	項目	数量	単位
人件費	普通作業員	0.5		人件費	普通作業員	0.5	
肥料		4	kg	肥料		4	kg

なお、維持管理に必要な人件費と材料費については、月間積算資料（（財）経済調査会、平成14年6月）⁵⁾より標準単価を引用した。表9.4-3に材料費と人件費を示す。

表9.4-3 遊歩道の除草に関する材料費、人件費（平成14年6月調査）

大項目	項目	数量	単位	備考
材料費	肥料	1320	円/20kg	普通化成
	農薬	2000	円/5kg	テゾレートA
人件費	普通作業員	15700	円/日	

水面の維持管理については、既往の標準歩掛の調査事例が収集できなかったため、過去において高知県南国土木事務所が平成16年度に実施したホテイアオイ除去費用を適用し、単位面積当たりの維持管理費を推定した。

以上の歩掛から、土地被覆ごとの単位面積当たりの維持管理コストを推定すると、芝地 19.11 円・m⁻²、水面 6.8 円・m⁻²、樹林地 12.85 円・m⁻²となった。都市緑地の維持管理コストの総計 Mc は、芝地面積を x₁、水面面積を x₂、樹林地面積を x₃とした場合、式(9-15)のとおり表現できる。

$$Mc(x_1, x_2, x_3) = 19.11x_1 + 6.80x_2 + 12.85x_3 \quad \dots \dots \dots \quad (9-15)$$

9.4.4 都市緑地の環境経営モデルの提案

(1) 環境経営モデルの概要

環境経営の可能性の検討に当たっては、利潤の配分法や運営組織の特性を考慮し、利潤を必要としないNPO型と、利潤を必要とする一般企業型の2通りに分け分析を行う。

① 利潤を必要としない経営モデル・・・NPOを想定

図9.4-5に、都市緑地を整備することによる収入と支出の関係図を示す。NPOの組織を想定し利潤を生み出す必要がないとした場合、単純に、収入と支出の均衡点Pが経営成立の分岐点となる。そこで、NPO型の環境経営分析に当たっては、整備と管理コストを総計した一人当たりの総コストと地域住民の一人当たり支払い意思額の均衡点を抽出することにより分析を行う。経営主体が自治体の場合、この支払い意思額は税金あるいは料金となり、その水準を住民に問うことが必要である。

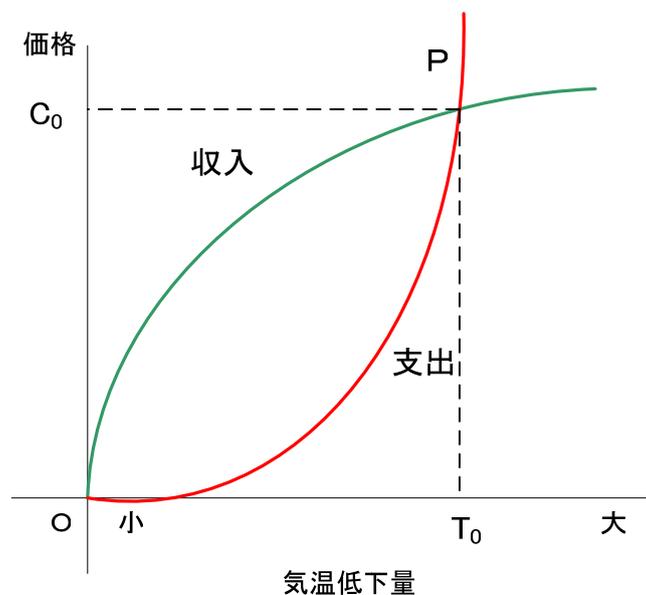


図9.4-5 都市緑地を整備することによる収入と支出の関係図

② 利潤を必要とする経営モデル・・・一般企業を想定

民間企業が環境経営を実施していくことを想定して環境経営の可能性について検討する場合、市場メカニズムの概念を導入し、社会的利益の最大化をもたらす都市緑地の環境経営に関して限界分析の考え方をを用いる。限界コストと限界支払い意思額は、それぞれ検討シナリオに住居する平均的な1地域住民の供給曲線と需要曲線をあらわしている。

図9.4-6に、都市緑地を整備することによる需要と供給の関係を示す。図9.4-6中の需要と供給の均衡点である点Qは、社会的総余剰が最大となる土地被覆の組み合わせである。

このとき、矩形 QC_sOT の範囲は、都市緑地の年間あたりの整備コストと管理コストの合計を表している。これに対して、 QC_dC_s の範囲は点 Q の土地被覆を整備することによる社会的総余剰であり、このうち、 QC_dC は $T^\circ C$ 低下させる都市緑地を整備することにより地域住民が得られる効用（消費者余剰）、三角形 QC_sC は都市緑地経営を担当する民間企業が C 円を地域住民から徴収することにより得られる利潤の最大値である。民間企業が都市緑地を環境資源として経営を実施する場合、地域固有の需要曲線と供給曲線を導出し、その均衡点に近づける計画を選択することにより、効果的な経営を実施することが可能である。仮に NPO など利潤を必要としない組織による経営を実施する場合は、この三角形 QC_sC に相当する利潤を整備や維持管理に転用することが可能であり、100%転用を仮定し金利を無視すると図 9.4-5 の収入と支出の均衡点 P と一致する。

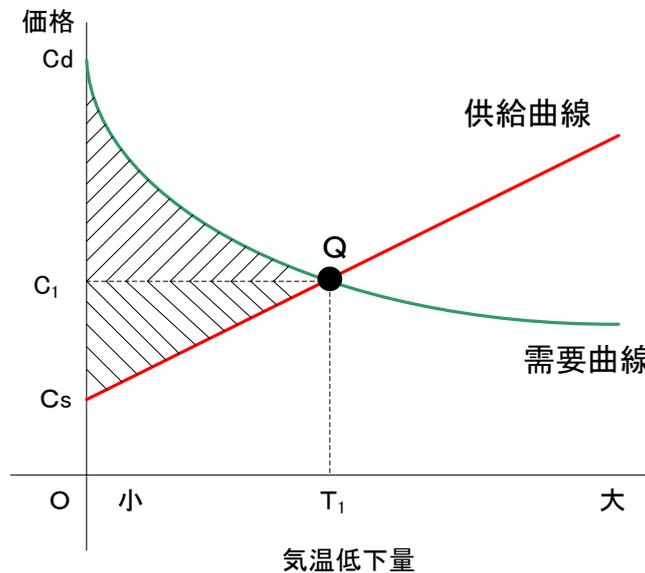


図 9.4-6 都市緑地を整備することの需要と供給曲線の関係図

(2) 環境経営モデルにおける検討シナリオの設定

経営における資源とは、①資金、②人材、③物理的資源などが考えられ、これらを効果的に組み合わせて創造されるのが環境効果である。都市緑地のクールアイランド効果は都市緑地の整備（資金）、維持管理（人材）、クールアイランド効果（物理的資源）の組み合わせにより効用を発揮するものであり、クールアイランド効果は経営対象になりえる。そこで、本項では、都市緑地のクールアイランド効果を経営対象とした場合の環境経営の可能性について、架空のシナリオを想定して検討した。検討に当たっての設定条件は、大都市の中に都市緑地を設置した場合の環境経営の可能性を検討することを目的として、1km 四方の住宅地の中に現在 20ha のアスファルトで被覆された未利用地が存在、地域住民を 15,000 人として、この 12,000 人に対して都市緑地を設置したことによる各種の効果を享受すると

仮定し検討を行った(図9.4-7)。

<環境経営モデルの検討に当たっての前提条件>

- 1km 四方の区画内に、20ha のアスファルトで構成された未利用地を想定し、そこに20ha の都市緑地を設置する
- 1km 四方の区画内には12,000 人が住居
- 都市緑地の設置による効果は1km 四方に住居する住民のみに享受され、その効果を維持管理するために必要なコストは1km 四方に住居する住民のみが負担する
- 気温低減効果の算定は植栽後15 年を想定する

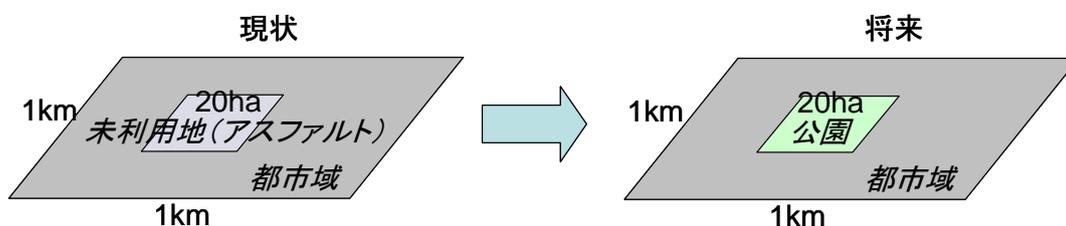


図9.4-7 土地利用の改変シナリオ

また、都市緑地に対する土地被覆上の制限条件として、都市緑地が持つ公益的機能から地球環境保護、生態系、景観面の3項目を抽出し、地域住民が都市緑地に持つ嗜好や社会的な要請について以下の仮定を設定し検討した。

<都市緑地設置に当たっての土地被覆上の制限条件>

都市緑地の芝地面積を x_1 、水面を x_2 、樹林地を x_3 として、

- 地球環境 (CO₂ 吸収効果)
都市緑地設置により、地区のCO₂ 排出量を0.5%削減したい。
 $0.00097x_1 + 0.0001x_2 + 0.0032x_3 \geq 50t$
- 景観
地域住民が都市緑地に期待する効用を想定
 $2.5x_1 - 3.0x_2 + 5.0x_3 \geq 200,000 \text{ m}^2$
 $x_1 : x_2 : x_3 = 1 : 0.5 \text{ 以上} : 1.25 \text{ 以上}$

この制限条件内の気温低減ポテンシャルは、最小値が(芝地面積、水面面積、樹林地面積)で(1ha, 0.5ha, 1.25ha)の組み合わせで0.36℃でCO₂ 排出削減量は50t、最大値が(芝地面積、水面面積、樹林地面積)で(0ha, 0ha, 20ha)で3.12℃でCO₂ 排出削減量は640tと予測される。

(3) 検討シナリオにおけるクールアイランド効果の効果関数及びコスト関数の設定

次に、検討シナリオに対応するクールアイランド効果の効果関数とそれを整備する際に必要な整備コスト関数、維持管理の管理コスト関数を設定した。

① クールアイランド効果の効果関数の設定

都市緑地を設置することによるクールアイランド効果の効果関数の設定に当たって、気温低減のポテンシャルは、8章で提示した方法である潜熱フラックスのみから推定する気温低減効果算定式により境界層100mと仮定して算定した。

都市緑地を構成する芝地面積を x_1 (m²)、水面面積を x_2 (m²)、樹林地面積を x_3 (m²)とした場合で1km四方における15年後の平均気温低減ポテンシャル(TDeg_c)は、次式で示される。

$$TDeg_c(x_1, x_2, x_3) = 1.3 \times 10^{-5} \cdot x_1 + 0.7 \times 10^{-5} \cdot x_2 + 1.6 \times 10^{-5} \cdot x_3 \quad \dots (9-16)$$

次に、クールアイランド保全視点からの都市緑地に対する住民支払い意思額を都市緑地の設置の有無による電気料金節約量と仮定し、9.4.1項で示した算定手順により推定する。表9.4-4に土地被覆の制限条件に対応する効用の最小値、最大値を示し、図9.4-8に、都市緑地の整備面積を20haと固定した場合の土地被覆面積率と1km四方の気温低減ポテンシャルの関係図を示す。

表 9.4-4 土地被覆の制限条件に対応する効用の最小値と最大値

土地被覆構成			気温低減ポテンシャル (°C)	住民支払い意思額 (円・日 ⁻¹ ・人 ⁻¹)
芝地(m ²)	水面(m ²)	樹林地(m ²)		
10,000	5,000	12,500	0.36	215.14
72,727	36,364	90,909	2.63	1560.85

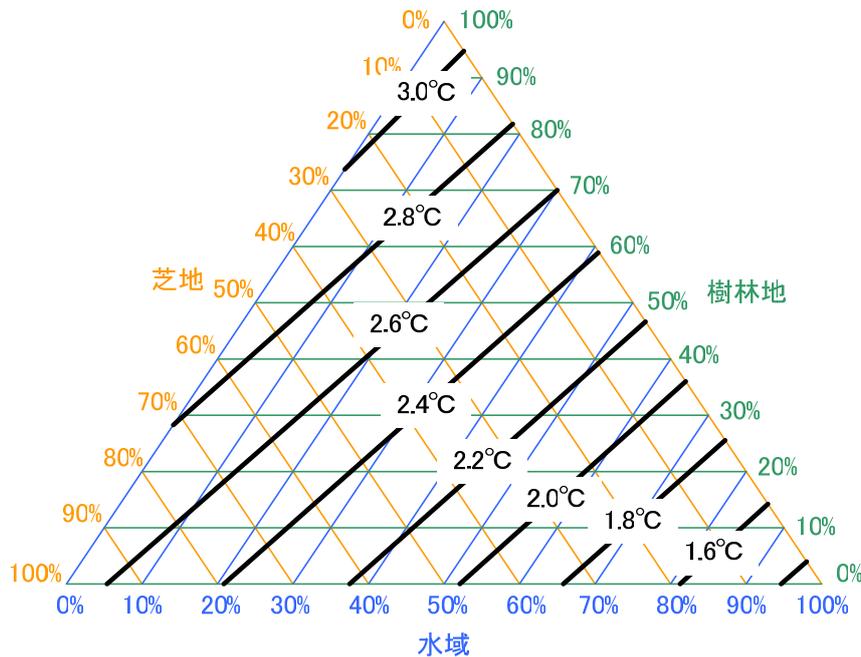


図 9.4-8 都市緑地の整備面積を 20ha と固定した場合の土地被覆面積率と 1km 四方の
気温低減ポテンシャルの関係

② コスト関数の設定

検討シナリオにおける都市緑地設置の際のコスト関数検討に当たっては、以下に示す 3 点を留意する。

整備コストの償却期間

国土交通省では都市緑地を設置する場合、評価年度を 50 年としている。そこで、本論では検討を容易にするために、都市緑地設置における償却期間を 50 年とし、毎年均等に償却していくと仮定して、検討シナリオの整備コスト関数を検討する。

整備コストの負担

都市緑地設置による効果は、都市緑地に近い地域ほど高く、離れるに従い低くなる。しかし、本論ではその効果を検討シナリオ一律と仮定し、整備コストや管理コストの負担を検討シナリオに住居する地域住民（12,000 人）が均等に支払うものとする。

都市緑地の効果の重み付け

2 章で示したとおり、都市緑地には様々な公益的機能を有する。よって、都市緑地を環境資源とする環境経営を検討する場合、これらの公益的機能の住民に対する効果を定量化し、都市緑地全体の効用と整備コストを比較する必要がある。本論では、試算レベルとして、都市緑地の整備コストを土地被覆の制限条件で検討した地球環境、景観、都市熱環境の 3 項目で均等に配分すると仮定して実施した。なお、3 項目に対する住民のニーズや支払い意思額は当然異なることから、それぞれについて異なる均衡点（環境整備レベル）が存在

することも今後考慮する必要がある。

都市緑地を設置する際に要する整備コスト(Cc)と管理コスト(Mc)は、構成される芝地面積を x_1 (m²)、水面面積を x_2 (m²)、樹林地面積を x_3 (m²)とした場合、式(8-8)、式(9-15)に示されるとおりである。これを上記の留意事項に配慮して検討シナリオの住民一人当たりへ換算すると、それぞれ式(9-17)、(9-18)であらわされる。

住民一人当たりの都市緑地整備コスト関数 (Cc1) :

$$Cc1(x_1, x_2, x_3) = 4.45 \times 10^{-3} \cdot x_1 + 6.34 \times 10^{-3} \cdot x_2 + 9.00 \times 10^{-3} \cdot x_3 \quad \dots \quad (9-17)$$

住民一人当たりの都市緑地管理コスト関数 (Mc1) :

$$Mc1(x_1, x_2, x_3) = 1.27 \times 10^{-3} \cdot x_1 + 4.53 \times 10^{-4} \cdot x_2 + 8.57 \times 10^{-4} \cdot x_3 \quad \dots \quad (9-18)$$

単年度に発生する都市緑地のコスト関数 (C1) は、整備コストと管理コストを加えたもので示される。図 9.4-9 に、都市緑地の整備面積を 20ha と固定した場合の土地被覆面積率とコストとの関係図を示す。

$$C1(x_1, x_2, x_3) = Cc1(x_1, x_2, x_3) + Mc1(x_1, x_2, x_3) \\ = 5.76 \times 10^{-3} \cdot x_1 + 6.80 \times 10^{-3} \cdot x_2 + 9.86 \times 10^{-3} \cdot x_3 \quad \dots \quad (9-19)$$

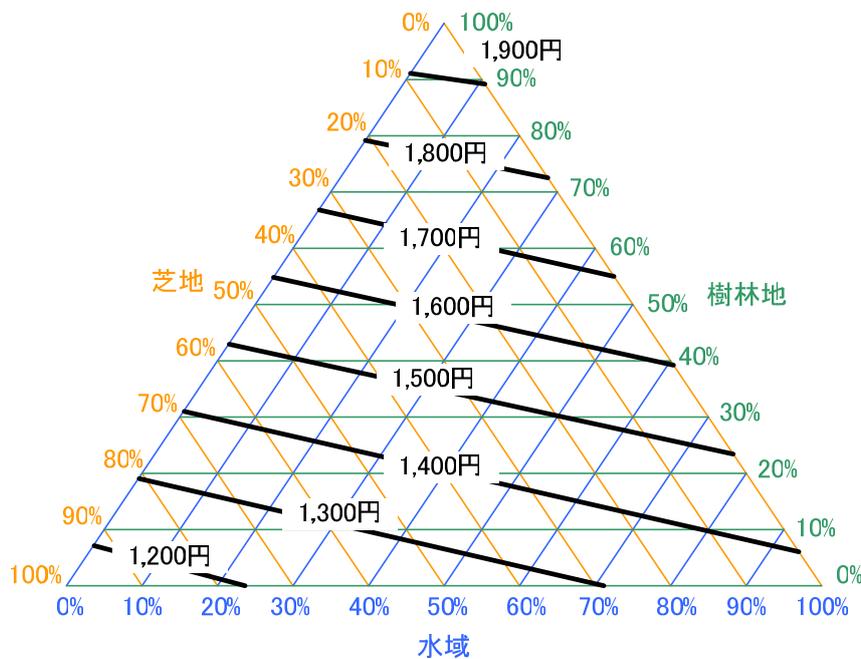


図 9.4-9 都市緑地の整備面積を 20ha と固定した場合の土地被覆面積率とコストとの関係図

(4) 都市緑地の整備及び維持管理にかかる環境経営モデルの検討

はじめに、土地被覆の制限条件下において、単位温度低減ポテンシャルあたりの効果的な整備コストを検討した。その結果、以下に示す直線ℓにおいて単位気温低下量あたりのコストが高いことが判明した。

$$\begin{aligned} \ell: x_1 &= 2x_2 = 0.8x_3 \\ x_1 &\geq 10,000 \end{aligned} \quad \dots \quad (9-20)$$

ここで、効率的な土地被覆の組み合わせが式(9-20)に示すとおり (x_1, x_2, x_3) 空間において直線となる理由は、本論において設定した気温低減モデルが線形（一次）であることによる。今後、地域の気温などの環境条件の影響をさらに厳密に考慮していくことにより気温低減モデルは線形にならないものと考えられる。

直線ℓ上における土地被覆面積と気温低減ポテンシャル、コストの関係を表 9.4-5 に、コストと整備効果の関係図を図 9.4-10 に示す。

表 9.4-5 直線ℓ上における土地被覆面積と気温低減ポテンシャル、コスト、支払い意思額の関係

土地被覆構成			気温低減ポテンシャル (°C)	(整備+管理)コスト (円)	住民支払い意思額 (円)
芝地 (m ²)	水面 (m ²)	樹林地 (m ²)			
10,000	12,500	5,000	0.36	214.805	215.148
20,000	25,000	10,000	0.73	429.610	430.127
30,000	37,500	15,000	1.09	644.415	644.934
40,000	50,000	20,000	1.45	859.220	859.572
50,000	62,500	25,000	1.81	1074.025	1074.045
60,000	75,000	30,000	2.17	1288.830	1288.348
70,000	87,500	35,000	2.53	1503.635	1502.482
72,727	90,909	36,364	2.63	1562.218	1560.854

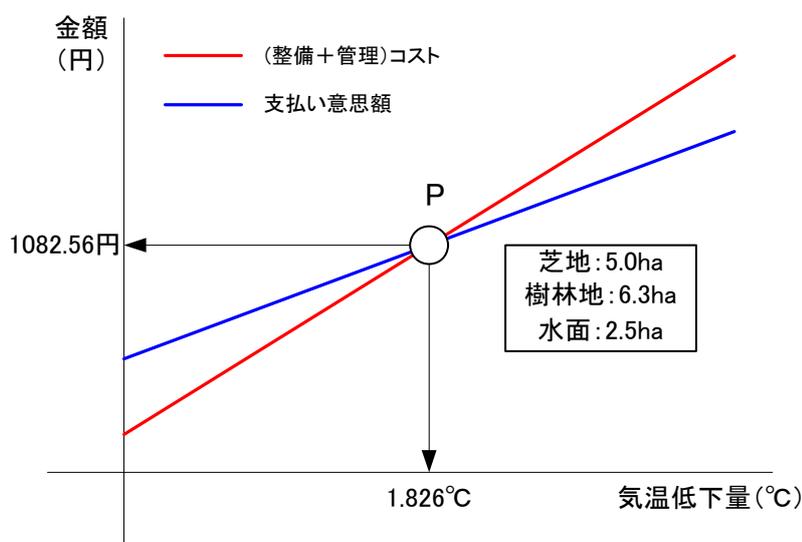


図 9.4-10 検討シナリオにおけるコストと WTP の関係図

検討シナリオにおける整備と管理コストを総計した一人当たりの総コストと地域住民の一人当たり支払い意思額の均衡点の均衡点を分析すると、図9.4-10に示すように、費用対効果の高い土地被覆の組み合わせである直線 l 上の芝地面積5ha、水面面積2.5ha、樹林地面積6.3haの点Pが気温低減ポテンシャル1.64°Cで、50年均等償却を仮定した場合、管理費込みで一人当たりの年間発生コストと住民一人あたりから得られる収入がともに1082.56円となり、検討シナリオにおける環境経営が成立する限界であることが示された。よって、上記の土地被覆構成に近づける都市緑地整備計画がNPO型の環境経営にとって必要となる。

次に、民間企業が環境経営を実施していくことを想定して環境経営の可能性について検討する。はじめに、表9.4-5で得られた整備+管理コストの限界値と支払い意思額の限界値との均衡分析を行った。表9.4-6に検討シナリオにおける限界コストと限界支払い意思額を、図9.4-11に都市緑地整備における気温低下量と需要曲線、供給曲線の関係を示す。

表9.4-6 検討シナリオにおける限界コスト

気温低減ポテンシャル (°C)	限界支払い意思額 (円)	限界コスト (円)
0.36	592.5	591.7
0.73	592.6	592.1
1.09	592.7	592.7
1.45	592.9	593.3
1.81	593.0	593.9
2.17	593.1	594.5
2.53	593.2	595.1
2.63	593.3	595.5

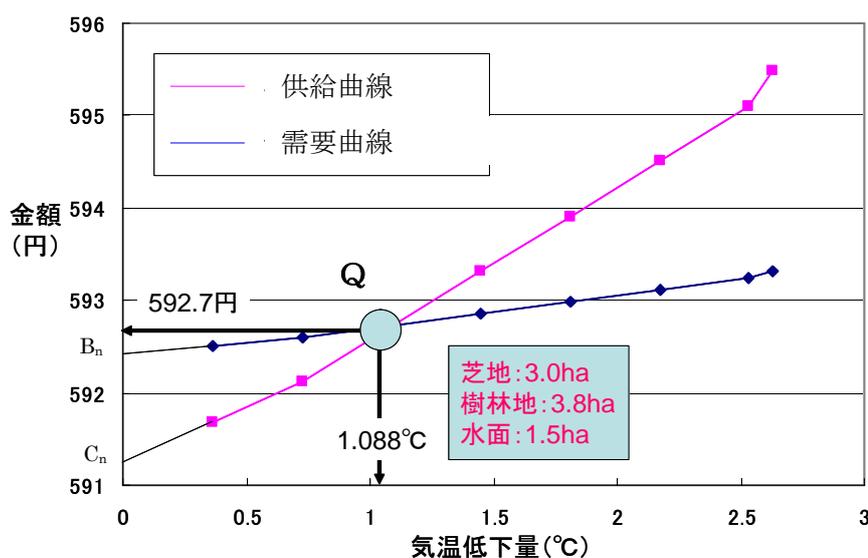


図9.4-11 都市緑地整備における気温低下量と供給曲線、需要曲線の関係

この場合、需要と供給曲線の均衡点Qの時の土地被覆構成である芝地 3.0ha、樹林地 3.8ha、水面 1.5ha により都市緑地を整備した場合、気温低下量が 1.088℃の効用が得られる。この場合のクールアイランド効果保全の視点からの整備+管理コストの総計は 774 万円であり、都市緑地を経営することによる企業の利益は、図 9.4-11 中の C_nQB_n で囲まれた範囲であり、年間 9311 円と試算された。図 9.4-11 において示した需要及び供給関数はある温度環境における気温低下量に対する関数である。今後、温度環境が低い場合には一定温度低下量に対する供給コストの上昇及び需要（支払い意思額）の低下を考慮した関数を用い、さらに精度の高い均衡分析が望まれる（図 9.4-12）。

本論では、都市緑地が持つクールアイランド効果のみの視点から、クールアイランド効果により得られる便益とそれに要するコストを比較することで環境経営の可能性について検討した。その結果、クールアイランド効果のみでは整備コストが収入を上回り環境経営は成立しないが、都市緑地の持つ各種公益的機能のうち3つを考慮し整備コストを均等に配分すると仮定した場合は、整備コストと収入の間に均衡点が成立する可能性を有し、都市緑地の整備から環境管理までの環境経営が成立することが示された。この環境経営モデルは、現在のところモデルの精度や現地への適用などの課題を有しているが、都市緑地の整備から維持管理までの環境経営を想定する場合に有効な手段となるだけでなく、行政側にとっても、都市緑地の必要性を地域住民に提示する手段としての活用（アカウントビリティ）が期待できる。

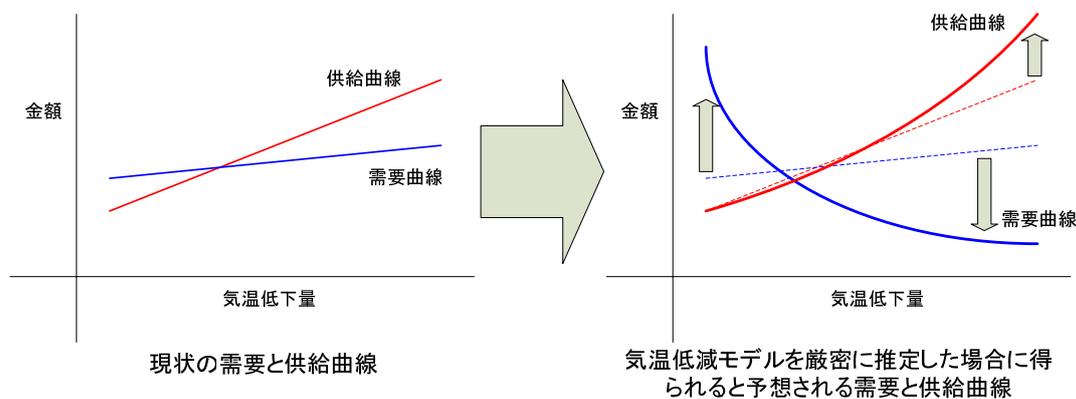


図 9.4-12 都市緑地のクールアイランド効果を経営対象とした環境経営モデルの方向性

9.4.5 都市緑地の環境経営モデル実現への課題

本節では、今後導入が予想される都市緑地経営モデルを提案した。この都市緑地経営モデルには、都市緑地のクールアイランド効果の定量化から予測、環境経済評価までの評価モデルを総合して導出している。よって、都市緑地経営モデルを一般化していくに当たっての改良点は、これらの検討項目を見直すことにより得られる。以下に、経営モデルの精度向上に向けての課題と解決策を示す。

(1) クールアイランド効果の定量化

本論では、東京都多摩市の多摩中央公園と高知県南国市に位置する石土池を、都市緑地のクールアイランド効果を評価するための代表モデルケースとして位置づけ、定量化を実施した。よって、都市緑地のクールアイランド効果を明確に表現するためには、都市緑地を周辺の人口密度別や土地利用状況（工業地域、商業地域、住宅地域）に区分し、それぞれについて熱環境調査を実施しクールアイランド効果を比較することにより、都市の集積度の違いや整備地域の特徴による違い、温度環境の違いがクールアイランド効果に及ぼす影響について、これらの指標を加味したモデルを構築していく。

(2) クールアイランド効果の予測

本モデルの精度を向上させるための検討項目は、以下の3点である。

① 樹齢と葉面積との関係

一般に、樹木のクールアイランド効果は、樹木の葉面において蒸発散することにより周囲の空気塊を冷却することにより生成される。よって、クールアイランド効果は樹木の葉面積と密接な関連があると予想される。多摩中央公園およびその周辺の都市公園を対象としてクスノキの樹齢と胸高直径の関係を数十年の範囲に亘ってモニタリングできるようなプログラムを実施し、樹木の樹齢と葉面積の関係を明確化する。

② 樹齢と NDVI の関係の精度向上

本論で提示した樹木の生長によるクールアイランド効果の予測は、樹木の樹齢と活性度の関係に着目している。よって、予測モデルの精度向上には、この両者の関係を量的に多く調査し、より精度の高い関係を得る必要がある。このためには、比較的多様な樹齢が混在している演習林を対象に、分光放射計を用いた葉面の活性度分析を実施し、樹齢と NDVI の関係を波長帯レベルで導出する。

③ NDVI と潜熱フラックスの関係の精度向上

本論では、多摩中央公園に位置する3種類の樹木（胸高直径 16,20,25cm）を対象に熱環境調査と航空機 MSS 撮影を実施し、それにより NDVI と蒸散量の関係をモデル化した。今後は、同一樹種の比較的多様な樹齢が混在している都市緑地を対象に熱環境調査を実施し、NDVI と潜熱フラックスの関係の精度をより高める。

(3) クールアイランド効果の効用曲線の見直し

本論で提示した都市緑地の環境経営モデルにおけるクールアイランド効果に対する住民が持つ効用は、都市緑地を設置することによる地域の気温低下効果により各家庭の空調機の電気料金が削減されるとして算定した。よって、人間の温度に対する嗜好性が入らず、図 9. 4-13 に示すように温度が上昇するにつれて直線的に効用が変化するという結果となった。

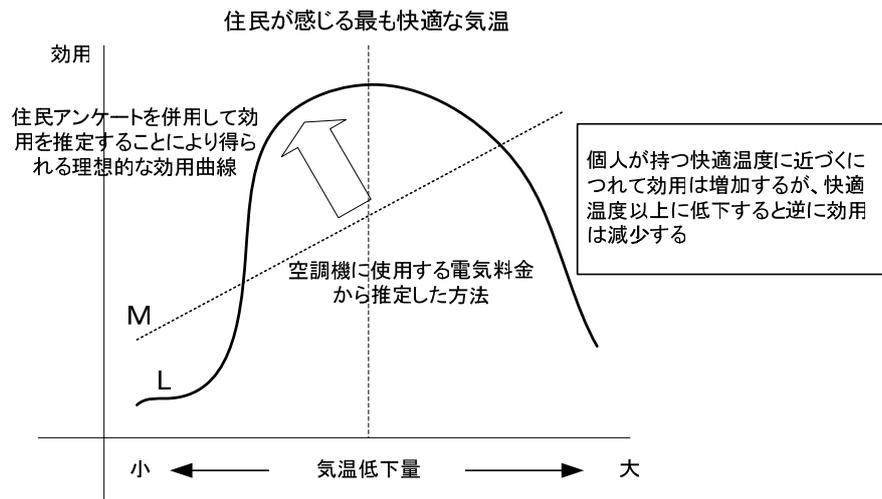


図 9. 4-13 住民に嗜好性を取り入れた効用曲線

しかし、人間の温度に対する価値を検討すると、個人にとって快適な気温があり、快適気温に近づくにつれて温度に対する効用は増加するが限界効用は逆に減少し、快適温度以上に気温が低下すると逆に効用は減少する（図 9. 4-13 中直線 L）特性を有するものと考えられる。そこで、モデルの改良点としては、都市緑地のクールアイランド効果に下記に示すアンケート調査を実施し、気温に対する住民の効用関数をより詳細に設定する。

<気温に対する住民の価値を問うアンケート（案）>

- 現在、A 地区では都市緑地を整備するプロジェクトが進行中です。この都市緑地を設置した場合、A 地区の平均気温が X℃低下すると予想され、これにより、A 地区の 1 世帯あたりの夏季の空調機使用料金は M 円削減するものと予想されます。この場合、都市緑地を整備および維持管理をするコストとしてあなたはいくらまで支払いますか？

このアンケートを実施し、クールアイランドに対する住民の嗜好を取り入れた効用関数を導くことにより、図 9. 4-9 に示す一般的な需要関数が導出することが可能と考えられる。

(4) クールアイランド効果関数の精度向上

本論で提示したクールアイランド効果関数は、都市緑地上空の空気塊が潜熱フラックスのみにより冷却されるとともに、潜熱フラックスによる気温の冷却効果が温度により一定であると仮定して、接地境界層より下の空気の気温低下量を算定した。

本効果関数の改良点は、以下の2点が考えられる。

① 潜熱フラックスによる気温の冷却効果の再検討

潜熱フラックスによる気温の冷却効果は、気温や気圧、相対湿度、風などに影響を受け一定ではないが、概略的に、気温が高いほど蒸発散が盛んに行われ冷却効果が大きく、気温が低くなるにつれて、効果が小さくなるものと予想され、図9.4-14に示すとおり、同じ樹林地面積を設置した場合でも、周辺の気温により温度低下量は変化すると考えられる。

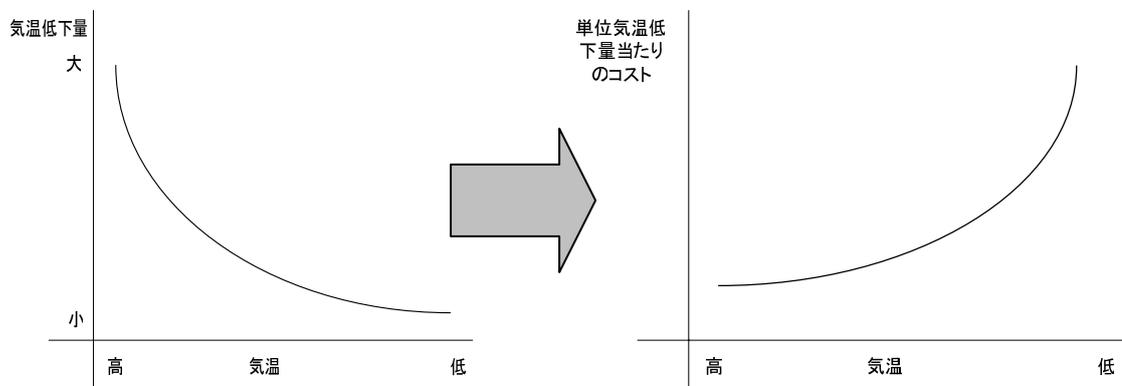


図 9.4-14 気温の違いによる単位樹林地面積設置あたりの気温低下量の推移予想図

よって、潜熱フラックスから気温低下量を算出する際に、空気密度や気化潜熱、水蒸気圧などの算出に当たって気温を考慮した算出手法を導入するとともに、現在の蒸発散量の総エネルギーから推定する方法（最大ポテンシャル）を見直す。

② 総合的な熱環境評価関数の構築

本論では、クールアイランド効果を植物や水面からの蒸発散（潜熱フラックス）の視点から評価した。しかし、クールアイランド効果には、樹木が生育し影ができることによる顕熱フラックスの減少効果や、水面へ熱量が蓄えられることによる気温の平滑化効果（夏季に太陽熱を蓄熱し、秋季から冬季にかけて熱を大気中へと拡散する効果）が考えられる。また、都市気象に影響を与える因子としては、顕熱による気温上昇効果や地中熱流量などが考えられる。潜熱フラックスの増加効果以外と顕熱、地中熱流量の視点を加えた総合的な熱環境評価モデルの構築が必要である。

(5) 都市緑地の整備及び維持管理のコスト関数の精度向上

本論では、都市緑地の整備や維持管理にかかるコスト関数の設定に当たって、樹林地・芝地については建設工事標準歩掛による植栽工に関する標準的な歩掛りと、月間積算資料に

よる材料や人件費の標準単価を引用して推定し、水域は高知県南国市に位置する石土池の設置コストを面積で除する手法により推定した。コスト関数の精度を向上させるためには、都市緑地の整備及び維持管理事例を多数収集し、都市緑地の植栽工の内訳、管理内容を分析していく。

(6) 生態系保全効果や防災効果など他の公益的機能を踏まえた総合的な都市緑地経営モデルの構築の必要性

本論で提示した都市緑地経営モデルは、都市緑地のクールアイランド効果の保全のみの視点から検討したものである。その結果、クールアイランド効果の効用のみでも都市緑地の維持管理コストを十分カバーでき、維持管理を目的とした環境経営モデルが成立できることを示している。今後は、本モデルに改良を加えるとともに、生態系保全効果や防災効果、景観効果などの評価を加え、都市緑地が持つ各種公益的機能を踏まえた総合的な都市緑地経営モデルへとバージョンアップしていく (図 9.4-15)。

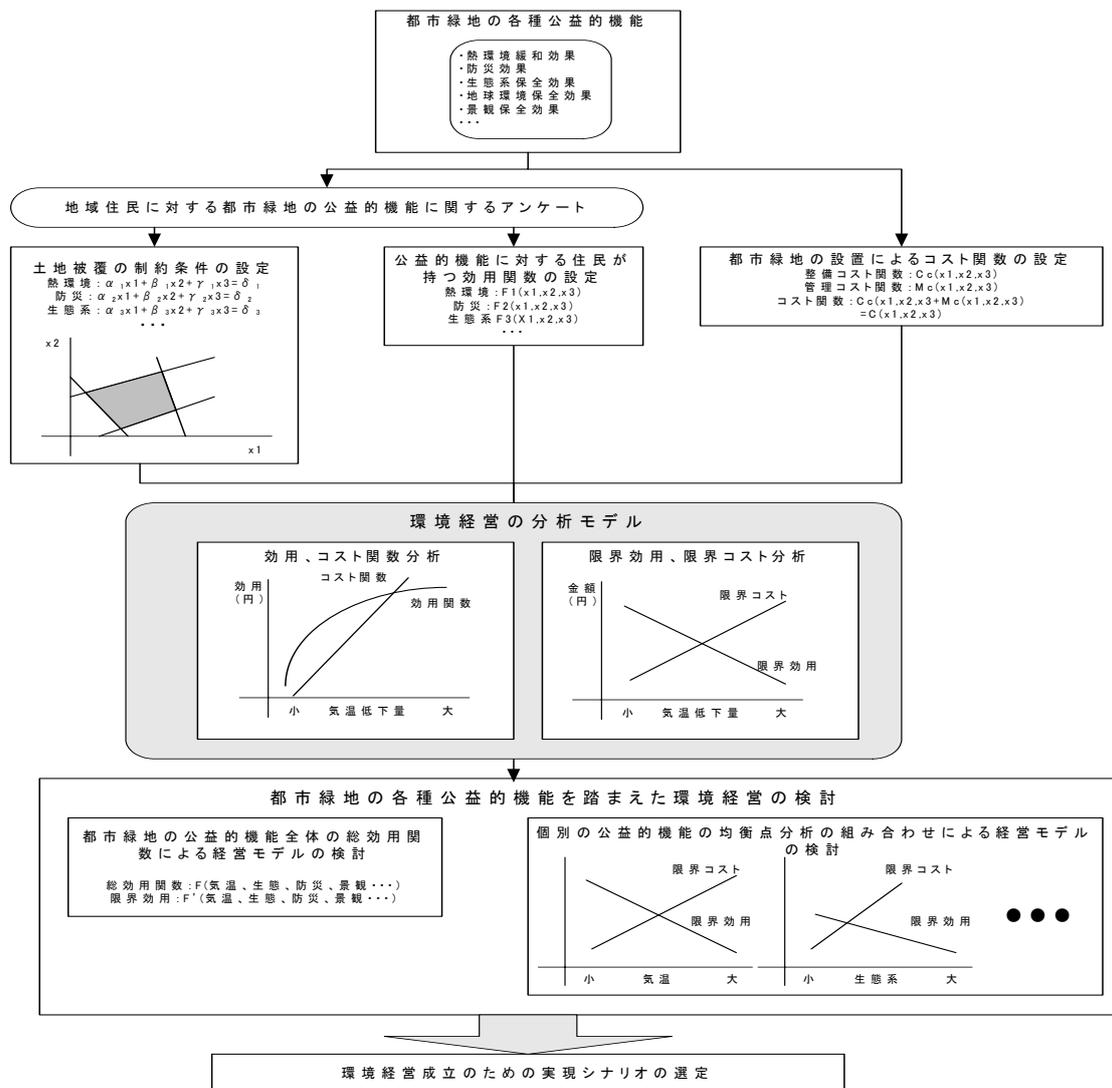


図 9.4-15 都市緑地の総合的な都市緑地経営モデルの概念図

第10章 おわりに

10.1 本研究のまとめ

本論では、夏季のヒートアイランド現象を緩和する効果を有する都市緑地に着目し、都市緑地が持つ気候緩和効果（クールアイランド効果）を定量化するとともに、予測、環境経済性までの流れを整理した。次に、クールアイランド効果の評価及び予測を通して、クールアイランド効果を機能させるための都市緑地の整備立案支援モデルを検討し、地域住民、行政、NPO（大学）の3者が連携して緑地の管理・運営にあたる持続的・自立的な環境管理・経営モデルを提案した。本論は、ヒートアイランド問題に配慮した都市緑地整備計画立案の新たな意思決定支援の一つのモデルとして、さらに、ここで提案した持続的・自立的な都市緑地の環境管理・経営モデルは、クールアイランド効果に配慮した新しい緑地管理計画を検討する際の一つのスタンダードとして意味を持つものと期待したい。以下に、本論の成果を整理する。

① クールアイランド効果に関する既往研究の展開と本論文の位置づけ

ヒートアイランドを緩和する対策としての都市緑化や水辺空間の設置は、持続性のある対策であるとともに景観や心理的影響等の面からも有効な対策として位置づけられ、クールアイランド効果を最大限に発揮する都市緑地のあり方を検討することが課題となっている。この課題を解決するためには、ヒートアイランド対策における都市緑地の位置づけを示し、都市緑地のクールアイランド効果の定量化するとともに、効果の定量化から将来予測、評価まで一連の流れを明確にする必要がある。しかし、都市緑地のクールアイランドに関する既往の研究を見てみると、緑地や池の水深、池面の被覆状態などクールアイランド項目全般を定量化した事例はなく、また、都市の人工排熱、ヒートアイランド、クールアイランドを総合的に検討評価した事例は少ない。また、クールアイランド効果の直接的な主要素である樹木、草、水面からの蒸発量を熱環境エネルギーと経済的な貨幣価値に換算して評価した事例研究は過去の主要論文にないのが指摘できる。

そこで、本論のターゲットとしては、都市緑地のクールアイランド効果の定量化から予測、環境経済評価までを対象とした評価モデルを提示するとともに、クールアイランド効果を機能させるための都市緑地の整備方針、クールアイランド効果を次世代にわたり持続させるための環境管理・経営モデルについて検討することとした。

② 都市熱環境問題における都市緑地の重要性の検証

都市の温暖化問題への関心が高まる中で、ヒートアイランドやクールアイランドなどの都市気候に関わる熱環境問題が新しい都市問題へのテーマとして浮上してきている。現在、政府が掲げている「環境と共生した都市づくり」は、1)省エネ・省資源・リサイクル（エネルギー）、2)水循環型（水）、3)都市大気保全・気候緩和・自然共生型（緑）の3本柱

の都市づくりの要素からなり、その中で「緑」と「水」は、自然の大気水循環システムを構成する重要な都市計画の環境構成要素でもある。そこで、都市内の緑の増減が都市熱環境に及ぼす影響及び緑地や水面の有する潜熱輸送による気温調整効果が地域レベルの温暖化に影響しているかをGISと衛星リモートセンシング技術、シミュレーション技術を用いて解析した。代表的な一例として、横浜市全域を対象として、夏期（8月）の晴天日の午前10:00（衛星ランドサットが横浜市上空を通過した時間）の気象条件で、市街化地区を10%、20%緑被率を増加させた場合、地表面温度は現状（気温換算：30.22℃）より -0.32℃（気温換算：30.12℃）、-0.89℃（気温換算：29.96℃）低下する。横浜市の平均気温は過去100年間で2.6℃上昇しているが、シミュレーション結果から、市街地を20%緑化することで約10年前の気温に戻すことが可能である。次に、住宅団地と大規模緑地と高層商業ビル群が共存するニュータウンを対象とした都市熱環境の現地気象観測とモデル・シミュレーション結果によれば、都市緑地がクールアイランドとなっており、緑地の冷気が若干ながら風下側へと移動して都市化地域の高温化を緩和している。都市内部のまとまった緑は、周辺地域の冷却源となるだけでなく、熱帯夜を緩和する効果を有する。

都市緑化のうち屋上緑化は、ヒートアイランドを抑止する効果はあるものの、多くの人々の目につかず、多様なエコ・トープを形成するシステムにはなりにくい。ある程度の範囲を持ったエコトープとしての緑が分布する都市緑地は、ヒートアイランド緩和だけでなく、生態系、景観、防災の視点からも都市に必要な環境構成要素の一つである。

③ 都市緑地のクールアイランド効果の評価モデル

都市緑地は、大気汚染緩和効果、気温調節効果、景観効果、心理的効果など様々な効果を有するが、近年の都市化に伴うヒートアイランドへの関心が高まる中で、都市熱環境を緩和する効果を期待する声が高まりつつある。現在、国土交通省は、都市緑地の環境価値の推定に当たって、利用価値、環境価値、災害価値の3点から評価を行っている。本論では、クールアイランド効果を植物や水面が蒸発散する際の気化熱である潜熱フラックスと定義し、都市緑地のクールアイランド効果の定量化から予測、環境価値の推定を潜熱フラックスから算出する評価モデルを提示することで、クールアイランド価値の新たな評価項目を設定した（図10.1-1）。

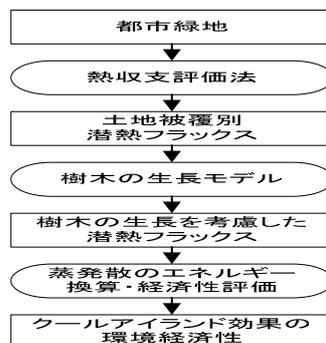


図10.1-1 都市緑地を対象としたクールアイランド効果の評価手順

④ 都市緑地のクールアイランド特性の定量化

本論では、植物や水面が蒸発散する際の気化熱である潜熱フラックスをクールアイランド効果として定量化する。

都市緑地のクールアイランド効果定量化の対象地は、首都圏東京に位置する典型的な都市緑地である東京都多摩ニュータウンの「多摩中央公園」と高知県南国市の十市パークタウンに建設された雨水調整池「石土池」である。多摩中央公園では樹林地と芝地、浅い水面（非対流性の水深50cmの人工池）を、石土池では水生植生が繁茂した水面（水深1~3mの半人工池）の熱環境特性をそれぞれ定量化し、都市緑地の「緑と水面」のクールアイランド効果について考察した。多摩中央公園は、多摩ニュータウンの造成に伴い新規に開発された都市緑地であり、①緑地の周囲は商業施設や住宅地で囲まれており都市緑地のクールアイランド効果が明確に把握でき、②広さ10haの比較的規模を持ったオープンスペースであり、③公園には樹林地や水面、芝地、公園施設など都市緑地を構成する典型的なパーツがすべて揃っている。石土池は、周辺の十市パークタウンの造成に伴い新規に整備された雨水調整池であり、①当地の夏季の気候特性として日中は南風が卓越し、東西に分布している樹林帯の影響を受けずに池のみのクールアイランド効果の計測が可能であること、②石土池の水面には抽水性水草（ハス）、浮遊性水草（ホテイアオイ）、浮葉性水草（ヒシ、ガガブタ）などがほぼ均等に分布し、水界植生の多様性と豊かさは都市緑地の公共水面設置モデルとしては理想に近い。よって、本論の対象地である「多摩中央公園」と「石土池」は、都市緑地のクールアイランド効果を評価するための代表モデルケースとして位置づけている。

多摩中央公園のケースでは、被覆別のクールアイランド効果をもっとも顕著に出る南中時（12:00）の潜熱フラックスは、樹林地が最も大きく（約 $519\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ）、次いで芝地（約 $401\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ）、浅い水面（約 $230\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ）の順となっており、樹林地のクールアイランド効果の優位性が示された。また、底面と側面をコンクリートで囲まれた水面の表面温度は昼間で 30°C を超え、夜間でも最低 25°C と高い水温状態が明け方まで継続している。これは、池の3面がコンクリートで構成されているため、昼間の貯熱量が底面のコンクリートを暖める熱量にも使われ、夜間にコンクリートから水塊へと熱が移動することにより、水温の高い状態が継続し明け方にかけても解消されず蓄熱が累積していくことが原因となっている。次に、石土池のケースにおける南中時の潜熱フラックスは、植生（ハス、ホテイアオイ、ヒシ・ガガブタ）で被覆された水面で $300\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、植生のない水面で $100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ であり、水面に水草が繁茂することによりクールアイランド効果は増加している。現地熱収支観測結果をもとに算出された潜熱フラックスは、既往の類似観測事例から算出された結果の範囲内にあり、少なくとも相対的な差異を議論するプロセスではオーダー的には妥当なレベルにある。

④ 都市緑地のクールアイランド効果の予測

森林が周辺の熱環境に与える影響は、絶えず変化しており一様ではない。これは、樹木が

永久不変なものではなく、生長や枯損によって更新され続けているからである。よって、都市緑地の熱環境緩和効果の予測を行う場合、熱収支モデルのほかに樹木の生長モデルを組み合わせた熱環境予測モデルの使用が不可欠である。そこで、本論では多摩中公園をモデルとして、樹木1本が識別できる航空機MSS画像と航空機MSSの撮影時間と同期させて実施した熱環境調査結果を用いてクールアイランド効果予測モデルを構築した。なお、クールアイランド効果予測モデルの構築に当たっては、樹木の毎木調査データの精度の問題やモデル構築に用いた樹木の本数が限られたことなどにより得られた結果の精度に若干の問題があると予想される。よって、本論中の位置づけとしては、方法論の提示のみにとどめ、本モデルの具体的な検証は今後の課題とした。

⑤ 都市緑地のクールアイランド効果の環境経済性

都市緑地のクールアイランド効果の環境経済性評価は未だ研究段階である。本論では都市緑地のクールアイランド効果の環境経済性として、水が蒸発する際に奪われる気化熱（潜熱）を天然のクーラー（冷房源）として位置づけ、クーラーに使用される石油エネルギーに代替させ、その石油エネルギーから生み出されるCO₂量を計測し経済性を算出する評価モデルを提示した。クールアイランド効果の環境経済評価モデルを用いて石土池をモデルに試算した場合、多様な植生で被覆されている現状の効果は122.70万円/日と試算され、その効果は、高知県における実質の県民総生産（平成13年度、日額：69.6億円）の約0.018%に相当する膨大な額である。

⑥ クールアイランド効果に配慮した都市緑地の整備計画立案支援モデルの検討

これまで検討してきた都市緑地のクールアイランド効果の評価モデルを応用して、クールアイランド効果を機能させるための都市緑地の整備計画立案の意思決定支援モデルとしての活用を検討した。本モデルは、都市緑地を造成した場合のクールアイランド効果や造成コストを都市緑地の土地被覆を指標として関数化し、実施効果が最大となる土地被覆の組み合わせを求めることができる。さらに、一定の予算配分下、土地被覆の制限条件などに対するクールアイランド効果の予測も可能である。

次に、クールアイランド効果を機能させるための都市緑地整備方針について以下に整理した。

- ・ 樹林地と同じクールアイランド効果を求める場合、樹林地面積の1.5倍の芝地面積、2.6倍の水域面積が必要となる（樹齢29年、20年後を試算）。よって、クールアイランド効果に配慮した公園緑地の土地利用計画は、緑地を多くし水面面積を少なくする方針で整備する。
- ・ コンクリートで覆われたオープンな浅い水深を持つ人工池の設置は避ける必要があり、壁面や底面を泥質又は砂泥質などの天然材料、または、自然の土壌を生かした構造に改善し、池の底面から下層部へ熱の移動を容易にさせる。

- ・ 池を水生植物（ハス、ホテイアオイ、ヒシ・ガガブタなど）で被覆し蒸発潜熱を増加させる。その場合の池に対する植生の被覆率は、植物プランクトンの増殖（富栄養化）を抑えるため、池全体の面積に対して3割程度を目標とする。これにより、池の潜熱フラックスは、植生のない場合と比較して1.2～1.5倍上昇する。

⑦ クールアイランド効果を保全するための持続的・自立的な都市緑地の環境管理・運営モデルの提案

都市緑地のクールアイランド効果を地域の次世代を視野に入れて保全するために、「石土池」を例にPCM(Project Cycle Management)手法を組み入れた環境管理モデルを検討した。

石土池は、多様な水生植物が水面の3割以上分布しているため、池の水質環境を保全し、かつクールアイランド効果をより高めているが、ホテイアオイが池の持続的な環境管理という視点から大きな問題になろうとしている。ホテイアオイは、冬季に枯死しその腐敗物が池底に沈殿するサイクルを繰り返すことにより池の水深が浅くなり、水質環境が悪化するとともに洪水調整機能が損なわれる要因となっている。そこで、池のクールアイランド効果を保全するために、ホテイアオイをハスなどの抽水性水草に置き換えて、良好な水質環境を保全するモデルを検討した。さらに、クールアイランド効果の保全を含む地域環境管理のモデルとして、三位一体（地域住民、NPO(大学)、行政)のコンセプトに基づいた持続的・自立的な環境管理モデルを提案した。本モデルは、行政や地域住民とNPO等の多様な主体が都市緑地管理のビジョンを共有しつつ、池の開発・管理にかかわる許認可とプロジェクト予算管理を行政側が、維持管理の具体的な企画・立案及び環境維持管理や利用面に関する各種プログラムの実施をNPOと地域住民が主体となって担当するシステムで構成される。これにより、管理運営の全体像と役割やミッションが明確になるだけでなく、このプロジェクトにかかわっている関係者同士での情報の共有化が進み、システム的な環境管理能力の育成の場となることが期待できる。

さらに、本論ではクールアイランドを効果的に機能させるとともに、都市緑地整備や維持管理コストと地域住民のニーズを両立させる都市緑地のあり方を導出する都市緑地の環境経営モデルについて検討した。環境経営モデルは、利潤の配分法や運営組織を考慮し、NPOを想定して利潤を必要としないモデルと、一般企業を想定した利潤を必要とするモデルに分け分析を行う。前者は費用対効果の均衡点から、後者は需要と供給モデルの均衡点からそれぞれ土地被覆の最適な配分を選定するとともに、都市緑地を整備する際に地域住民の負担額や得られる効果が把握できる。

10.2 今後の課題

今後の課題について以下に示す。

- 快晴以外の気象条件をも考慮した都市緑地のクールアイランド効果の定量化

本論では、夏季の快晴の日を対象に熱環境評価を実施した。樹木のクールアイランド効果

は夏季の日中に顕著に効果が発揮される。しかし、熱環境全体を評価するためには、快晴以外の気象条件にも配慮するとともに、顕熱フラックスによる気温上昇効果や貯熱（地中熱流量）の気温平滑化効果を含め、熱環境を総合的に定量化する段階で各パラメータのクロスチェックが必要である。

● 樹木などの影や水面への貯熱量を加えたクールアイランド効果の総合的な評価の必要性

本論では、クールアイランド効果を植物や水面からの蒸発散（潜熱フラックス）の視点から評価した。しかし、クールアイランド効果には、樹木が生育し影ができることによる顕熱フラックスの減少効果や、水面へ熱量が蓄えられることによる気温の平滑化効果（夏季に太陽熱を蓄熱し、秋季から冬季にかけて熱を大気中へと拡散する効果）が考えられる。よって、これら潜熱フラックスの増加効果以外の視点を加えた総合的なクールアイランド評価システムの構築が必要である。

● 樹木の生長モデルの改良

本論においては、多摩中央公園の熱環境を予測する際の樹木の生長モデルに、九州南部のクスノキ試験林で調査された樹齢と胸高直径の調査結果を適用した。しかし、東京地方とは地理的、気候的に差がある九州南部のデータを適用することには問題がある。さらに、試験林と都市緑地に分布しているクスノキでは維持管理手法に明確な差があり、生長量も異なると予想される。そこで、多摩中央公園およびその周辺の都市公園を対象としてクスノキの樹齢と胸高直径の関係を数十年の範囲に亘ってモニタリングできるようなプログラムが検討されることに期待したい。

● 持続的・自立的環境管理モデルの実証研究の必要性

本論で提案した持続的・自立的環境管理モデルは、都市緑地の管理に住民とNPO（大学）が連携した公園管理団体が行政の管理の下で実施し、それを住民が継続的にチェックするシステムを提案したが、この思想は、地域における社会問題の解決には地域住民や管理者の自主的な取り組みが重要であるという概念が浸透している米国で成立するものである。そこで、本計画を日本において実際に適用し、その問題点と課題を住民、NPO（大学）、行政と連携して抽出することにより、日本版の緑地管理モデルを構築していく必要がある。

● 持続的・自立的環境管理モデルと都市緑地経営モデルの実証研究とモニタリングの必要性

本論で提示した都市緑地経営モデルは、都市緑地のクールアイランド効果を“資源”として、緑地経営の可能性を検討したものである。しかし、既存の環境経営の概念は、経営方針そのものの中に積極的に環境問題を組みこむことを意味しており、環境質そのものを経営資源として都市緑地整備から維持管理までを検討した事例はほとんど無い。そこで、本モデルをより発展させていくためには、経営学や経済学、環境経済学など多岐にわたる専門家の意見を参考にするとともに、都市緑地整備に当たって現地に適用することによる実証研究とモニタリングを重ねていく必要がある。

謝 辞

本論文は、筆者が日本工営株式会社の技術者として、1990年代当時において極めて先進的で研究的要素の高い都市熱環境に関わるプロジェクトをベースとして、著者が高知工科大学工学研究科博士課程に2002年度から2005年度までの期間中在籍した研究を追加し、高知工科大学フロンティア工学コース村上雅博教授のご指導の元にまとめたものです。村上雅博教授には、私が日本工営株式会社に在籍しこの研究を始めた当初から本論文をまとめるまでの長期間に渡り、懇切丁寧なるご指導とご教示を賜りましたことを心より御礼申し上げます。また、本論文の独自性の一つである都市緑地の環境経営について検討の視点や考え方をご教授いただいた高知工科大学社会システム工学コースの草柳俊二教授、那須清吾教授に心から御礼申し上げます。また、都市緑地のクールアイランド効果の環境経済評価に際して適切なお助言をいただきました渡辺法美助教授、航空機MSS画像を用いたクールアイランド効果の予測に示唆いただいた高木方隆教授に御礼申し上げます。

なお、本論文は横浜市と東京都多摩市多摩中央公園、高知県南国市十市パークタウンにおいて熱環境調査を実施しクールアイランド効果の評価を行いました。調査の遂行及び対象地域の特性について助言いただきました横浜市 中田穂積部長、中村孝一氏、住宅都市整備公団 柳原和憲課長、高知県南国土木事務所 井上裕志所長、横山芳正課長、浜口洋介班長に厚く御礼申し上げます。都市緑地のクールアイランド効果の定量化にあたりまして東北大学の澤本正樹教授に的確なお指導とご意見を頂きましたことに対して、心より御礼申し上げます。

都市緑地の熱環境調査を補助していただいた日本工営（株）佐藤律子氏、今村史子氏、高知工科大学村上研究室に在籍していた中田智子氏、森進一郎氏、村上研究室の皆さまには深く感謝します。

平成 17 年 9 月 20 日

参 考 文 献

第 1 章

- 1) IPCC (2001) Third Assessment Report: Climate Change 2001
- 2) 環境省(2003):平成12年度ヒートアイランド現象の実態解析と対策のあり方について報告書(増補版)、pp6
- 3) 東京都(2004):東京都統計年鑑(平成14年)
<http://www.toukei.metro.tokyo.jp/tnenkan/2002/tn02qyti0510a.htm>
- 4) 環境省(2001):平成13年度ヒートアイランド対策手法調査検討業務報告書
- 5) 気象庁(2004):2004年気象年鑑、気象庁
- 6) 中部ニュービジネス協議会(2004):名古屋のヒートアイランド対策への提言～「風の道」を利用した広小路通のまちづくり～、pp7

第 2 章

- 1) 環境省(2003):平成12年度ヒートアイランド現象の実態解析と対策のあり方について報告書(増補版)
- 2) 近藤純正(2000):水循環の気象学、朝倉出版、pp108-114
- 3) 近藤純正(2000):水循環の気象学、朝倉出版、pp128-138
- 4) 三澤正(2000):東京における都市化に伴う気温の永年変化、地理学研究報告、Vol. 11、pp1-7
- 5) 武市伸幸(2002):高知県南国市のヒートアイランドと形成要因、天気、49. 1、pp47-56
- 6) 榊原保志(1994):越谷市に見られるヒートアイランド強度-郊外が水田の場合-、天気、41、pp515-523
- 7) 榊原保志(1999):長野県小布施町におけるヒートアイランド強度と郊外の土地被覆との関係、天気、46、pp567-575
- 8) 西尾美徳(1997):豊橋市におけるヒートアイランドについて、地理科学、Vol. 52、pp207-221
- 9) 榊原保志 他(1998):長野市における夜間ヒートアイランド強度に対する風速と接地逆転の強さの関係、天気、45、pp119-126
- 10) 武市伸幸(1986):佐賀市の気温分布と形成要因、東北地理、Vol. 38、pp16-23
- 11) 武市伸幸(2000):高知市の接地逆転とヒートアイランド、地理科学、Vol. 55、pp99-106
- 12) 藤野毅、浅枝隆(1999):盆地内における湖岸の小都市ヒートアイランド特性について、天気、46、pp317-326
- 13) 李海峰 他(2000):土地利用図を用いた都市の熱環境評価手法に関する研究-巨大50km圏におけるケーススタディ」、日本建築学会計画系論文集、第530号
- 14) 尾島俊雄(1982):環境場設定のSpace Modular Co-ordination Chart-その1 時空

- 間分割表- 日本建築学会論文報告集、第 319 号、pp84-89
- 15) 尾島俊雄(1982)：環境場設定の Space Modular Co-ordination Chart-その 2 実用化への考察- 日本建築学会論文報告集、第 320 号、pp108-115
 - 16) Bach, W. (1970): An urban circulation model, Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology, Ser. B, 18, pp155-168
 - 17) 河村武 他(1992)：環状八号線上空に発生する雲（環八雲）の気候学的考察、日本気象学会春季大会予稿集、Vol. 61
 - 18) (財) 電力中央研究所(1999)：研究年報 1999 年度版、pp44-45
 - 19) 梅干野晃(2002)：屋上緑化とヒートアイランド、JSCE、Vol. 87、pp64-69
 - 20) 金子慎治・前田利家・上野賢仁・井村秀文 (1994)：リモートセンシング輝度温度による都市域気温分布の推定-北部九州、関西、関東 3 地域への適用と比較-、環境システム研究、Vol. 22、pp. 267-273
 - 21) Kimura F. and Takahashi S. (1991): The effects of landuse and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area - a numerical experiment -, Atmospheric Environment, Vol. 25b, pp155-164
 - 22) 大黒雅之 他(1989)：一次元モデルによる都市大気のシミュレーション その 1 モデルの概要、日本建築学会大会学術講演概要集、pp1109-1110
 - 23) 村上周三・大場正昭(1977)：地表面温度差の物質拡散に及ぼす影響について、生産研究、29 卷、pp106-111
 - 24) 森川泰成・大場正昭 他(1978)：床面に温度差がある成層流の気流性状並びに拡散に関する風洞実験 その 4-温度差のある平板上に直方体模型を設置した場合、日本建築学会学術講演概要集、pp297-298
 - 25) 岡建雄(1978)：市街地空間の熱的環境に関する研究、日本建築学会論文報告集、第 266 号、pp105-114
 - 26) 植松史博・片山忠久・林徹夫・谷本潤・萩島理・片多奈津子(1998)：都市内外における乱流輸送量に関する研究（その 1）測定概要および測定基本データ、日本建築学会九州支部研究報告、第 37 号、pp. 169-172
 - 27) 神田 学, 高柳百合子, 横山 仁, 森脇 亮 (1997)：銀座オフィスビル街における熱収支特性, 水文・水資源学会誌、Vol. 10, No. 4、pp329-336
 - 28) 環境省(2003)：平成 12 年度ヒートアイランド現象の実態解析と対策のあり方について報告書（増補版）、pp31-32
 - 29) Akbari H. et al (1992):Cooling our communities - A Guidebook on tree planting and light colored surfacing, US Environmental Protection Agency
 - 30) 水島雅文 (2000) ヒートアイランド現象の緩和とエネルギー消費の抑制, 新都市, 54 (7), pp13~18
 - 31) Hassid, S. (1998) : The Effect of the Athens Heat Island on Air Conditioning Load,

- Internal report, University of Athens, Group Building Environmental Studies
- 32) 金沢啄・井村秀文(1992)：地域のエネルギー消費構造分析における産業連関モデルの適用、環境システム研究、Vol. 20、pp242-251
 - 33) 平松直人、花木啓祐・松雄友矩(1992)：エネルギー消費の大都市比較、環境システム研究、Vol. 20、pp252-261
 - 34) 上野賢仁 他(2000)：都市域の家庭の夏季空調エネルギー負荷と家族形態との関連分析、環境システム研究、Vol. 28、pp69-75
 - 35) 上野賢仁：都市熱環境とエネルギー消費及び住民意識に関する調査研究
 - 36) 坂口淳 他(2001)：新潟市に建設された住宅における室内温熱環境とエネルギー消費量に関する研究、日本建築学会計画系論文集、第 543 号、pp33-39
 - 37) 依田浩敏 他(2001)：環境共生型集合住宅におけるエネルギー・水消費量の実態調査、日本建築学会計画系論文集、第 549 号、pp67-74.
 - 38) 萩島理、片山忠久、林徹夫、谷本潤(1999)：樹木の放射温度分布に関する実測、街路樹のある街路の温熱環境予測 その 1、日本建築学会計画系論文集、No. 516、pp. 79-86
 - 39) 萩島理、片山忠久、林徹夫、谷本潤(1999)：数値計算による街路樹の暑熱緩和効果の評価、街路樹のある街路の温熱環境予測その 2、日本建築学会計画系論文集、No. 525、pp. 83-90
 - 40) 山田宏之(1995)：都市気温分布と緑地分布の関連性についての都市間比較、ランドスケープ研究、58 (5)、pp253~256.
 - 41) 神田・日野(1990)：大気-植生-土壌系モデル (NEO-SPAM) によるシミュレーション (2) 植生の気候緩和作用の数値実験、水文・水資源学会誌、Vo. 3、1990
 - 42) 成田健一・植村明子・三坂育正(2001)：都市気候に及ぼす河川水の熱的影響に関する実測研究、日本建築学会計画系論文集、第 545 号、pp71-78
 - 43) 井上君夫(1985)：水田微気象のシミュレーションモデル、農業気象、Vol. 40(4)、pp353-360
 - 44) 内島善兵衛：水温の熱収支気候学的研究、農業技術研究所報告、A 第 7 号、pp131-180
 - 45) 中山敬一・浦野永久・今久・松岡延浩：アオコの発生が水体の熱収支に及ぼす影響、農業気象、Vol. 48(3)、pp359-363
 - 46) 鈴木多七：森林経理学 -直径遷移-、朝倉書店、II-1
 - 47) 東敏生・寺田公治(1994)：衛星データを利用した流域の森林管理技術の確立 (II)、日林関西支論 3、pp25-28
 - 48) 住宅・都市整備公団 南多摩開発局(1996)：多摩ニュータウンにおける緑化と大気熱環境、pp117
 - 49) 鈴木雅一・塚本良則(1992)：森林水文学
 - 50) 水谷完治 他(1992)：赤外湿度変動計を用いたスギ人工林の蒸発散量の測定、日林誌、74(2)

- 51) 森本幸裕 他：街路樹ケヤキの活性度診断、日本緑化工学会誌、Vol117(1)
- 52) 鈴木雅一(1991)：森林からの蒸発散、水文・水資源学会誌、Vol14(2)、pp9-22
- 53) 吉田弘・端野道夫・岡村浩璽(1993)：ヒートパルス速度と微気象データを利用した林木蒸散量推定法の提案、水文・水資源学会誌、第6号(4)、pp350-357
- 54) 奥村武信・水中進一・前田浩行(1989)：広葉樹林の蒸散量推算へのヒートパルス法適用に関する研究、広葉樹研究、No. 5、pp173-184
- 55) 服部重昭 他(1993)：ヒノキ林における土壌水分と飽差が蒸発散に及ぼす影響、日林誌、Vol175(3)
- 56) 本條毅・高倉直(1984)：緑地が都市熱環境に及ぼす影響（1）実測に基づく熱収支的解析、農業気象、40(3)、pp257-261
- 57) 近藤純正・石井正典(1993)：熱収支法による樹幹遮断量の推定と観測との比較、水文・水資源学会誌、Vol16(1)、pp19-30
- 58) 原菌芳信・清田信・矢吹萬寿(1992)：林地と造成された芝地の熱環境および水収支の特徴、農業気象、48(2)、pp147-155
- 59) 山野井克己・大谷義一(1992)：乱流変動法を用いたヒノキ林のエネルギー収支と蒸発散特性、日林誌、74(3)
- 60) 石井正典(1991)：山地流域を対象とした蒸発散量の推定法及びそれと林況の関係、水文・水資源学会誌、第4号(3)、pp45-52
- 61) 岡田啓嗣 他(2000)：人工衛星を使用した地域蒸発散量の推定、農業気象、56(4)、pp261-273
- 62) 星仰(1990)：リモートセンシングによる広域蒸発散量の誤差分析、情報処理学会第41回（平成2年後期）全国大会講演論文集（1）、3M-2、pp. 158-159
- 63) 開発一郎・塚本修・林陽生・宮崎真・安成哲三(1999)：モンゴル高原 GAME-AAN/PAM サイトの晩夏の日蒸発散 -1997年9月の観測例一、水文・水資源学会 1999年度総会・研究発表会論文集
- 64) 佐渡公明（1994）：衛星データを用いた広域蒸発散量の推定、水文・水資源学会誌、7(4)、pp. 315-324
- 65) 近藤光男 他（1983）：樹木、芝生の微気象調節効果に関する実証的研究、造園雑誌、46（3）、pp191～175
- 66) 栗山浩一(2002)：環境経済学、新鐘 No. 65 早稲田に聞け！シリーズ1 経済、
<http://www.waseda.jp/student/shinsho/html/65/6528.html>
- 67) 大野栄治(2000)：環境経済評価の実務、肋草書房、pp35-104
- 68) 高原栄重(1986)：都市緑地 I 「都市緑地の計画」 pp63-182
- 69) 川村久幸・安田八十五・鳴海正泰(2001)：東京湾の盤洲干潟における環境の経済的価値の評価と測定、環境経済・政策学会 2001年大会・報告要旨集、pp248-249
- 70) 鷲田豊明・栗山浩一・竹内憲司(1998)：藤前干潟の CVM による全国調査結果、名古屋

- 屋市市政記者クラブ・記者発表資料(10月)
- 71) 萩原清子・萩原良巳・張昇平・清水丞(1998)：都市域の水辺の環境評価、応用地域学研究、3、pp133-141
 - 72) 亀山宏(1995)：溜池の多面的機能の便益評価、香川大学農学部紀要、60、pp92-106
 - 73) 小池(1986)：林政総研レポート No30 森林・林業の評価手法
 - 74) 吉田謙太郎(1997)：CVMによる水道水源林の経済的評価-横浜市と東京都の事例分析-、水利科学、41(4)、pp23-54
 - 75) 日本学術会議(2001)：地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価について(答申)、pp85-97
 - 76) Pearce D. W. (1989)：新しい環境経済学(和田憲昌 訳)
 - 77) 山崎福寿(1991)：自動車騒音による外部効果の計測-環状7号線を対象として、環境科学、Vol. 4 No. 4、pp251-264
 - 78) 環境省(2001)：環境白書
 - 79) 中央青山監査法人(2002)：排出権取引の実務、(株)中央経済社、pp2-13

第3章

- 1) 横浜市(1991)：横浜市の資源とエネルギーの効率的利用についての調査-平成2年度
- 2) 守田優(1994)：都市の人工排熱構造について-日本の8大都市を対象にして-、環境システム、21、pp19-26
- 3) 横浜市環境保全局(1991)：横浜市の資源・エネルギーの効率的利用に関する調査、pp1-65
- 4) 東京都(2004)：東京都統計年鑑(平成14年)
<http://www.toukei.metro.tokyo.jp/tnenkan/2002/tn02qyti0510a.htm>
- 5) 環境省(2001)：平成13年度ヒートアイランド対策手法調査検討業務報告書

第5章

- 1) Morgan et al. (1997)：Microclimates within Urban Area, *Annals of the Association of American Geographers*, Vol16 No. 1, pp55-65
- 2) 川島茂人(1986)：航空機MSSデータによる地表面熱収支分布の評価、天気、33、pp7
- 3) 杉田 他(1992)：Tsukuba92 水文学・境界層気象学における異なるスケール間の関係解明のための共同観測計画
- 4) 竹内・近藤(1993)：大気科学講座1「地表に近い大気」、東京大学出版会、p21
- 5) 近藤純正(2000)：水循環の気象学、朝倉出版、pp128-138
- 6) 神田 学, 高柳百合子, 横山 仁, 森脇 亮(1997)：銀座オフィスビル街における熱収支特性、水文・水資源学会誌, Vol. 10, No. 4, pp329-336
- 7) 石津純一・内藤 豊・原田 宏・松本忠夫・柳澤富雄・山田晃弘(1986)：図解「生物

学データブック」、丸善、pp67

- 8) 原菌芳信・清田信・矢吹万寿(1992)：林地と造成された芝地の熱環境及び水収支の特徴、農業気象、48(2)、pp147-155
- 9) 森進一郎(2005)：シンチレーション法を適用した熱収支解析と芝地のクールアイランド効果について、高知工科大学修士論文
- 10) 野島義照(2001)：地上、屋上及び壁面の緑化によるヒートアイランド対策効果、緑の読本、57、pp75-82
- 11) 成田健一・植村明子・三坂育正(2001)：都市気候に及ぼす河川水の熱的影響に関する実測研究、日本建築学会計画系論文集、第545号、pp71-78

第6章

- 1) 鈴木多七：森林経理学 -直径遷移-、朝倉書店、II-1
- 2) (財)日本緑化センター(1986)：適地適木調査・緑化樹木の生長

第7章

- 1) 環境省(2001)：「目標達成シナリオ小委員会」中間取りまとめ報告書、pp151

第8章

- 1) 環境省(2004)：平成17年度環境省重点施策
- 2) 東京都(2002)：都市と地球の温暖化阻止に関する基本方針
- 3) 近藤純正(2000)：水循環の気象学、朝倉出版、pp128-138
- 4) (財)建設物価調査会(2002)：建設工事標準歩掛、pp500-503
- 5) (財)経済調査会(2002)：月間積算資料
- 6) 国土交通省：大規模公園費用対効果マニュアル、国土交通省都市・地域整備局公園緑地課
- 7) 国土交通省：小規模公園費用対効果マニュアル、国土交通省都市・地域整備局公園緑地課

第9章

- 1) 富永一夫(2000)：NPO「ぼんぽこ」、日本放送出版協会
- 2) 文化環境研究(2001)：自然保護と公共利用の狭間で - 米国の国立公園事情 - ，
http://www.bunkanken.com/archive/today_yosemite/yosemite00.html
- 3) 赤熊伸彦(2003)：セントラルパーク管理委員会、自治体国際化フォーラム、Oct. 2003、pp24-26
- 4) 後藤和夫(1998)：環境教育の拠点を目指して-国営木曾三川公園の取り組み-、公園の管理、No. 13、pp10-13

- 5) 山下英夫(1998) : 国営武蔵丘陵森林公園における環境教育への取り組み、公園の管理、No. 13、pp14-19
- 6) 公園・緑地維持管理研究会(1997) : 公園・緑地の維持管理と積算、新晃社、pp54
- 7) 小河原孝生(1998) : 環境教育プログラムと施設、人材の重要性、公園の管理、No. 13、pp26-31
- 8) (財) 国際開発高等教育機構 : PCM-開発援助のためのプロジェクト・サイクル・マネジメント-
- 9) 環境省 : 全国湖沼資料集<第14集>
- 10) RIZA(1999)、"Stoneworts"
- 11) 小島貞夫(2000) : おいしい水の探求、NHK ブックス
- 12) (独) 国際協力機構 : プロジェクト評価の実践的研究、国際協力出版会、pp126-127
- 13) (財) 省エネルギーセンター(2005) : 省エネルギー対策実態調査-家庭編- 平成 15 年度版
- 14) 今木清康(1993) : 空気調和工学、産業図書 (株)