

# 放射エクセルギーの概念に基づいた地域熱環境の評価

松崎 彩<sup>1</sup>・巖 網林<sup>2</sup>

<sup>1</sup>非会員 環境情報学 日本工営株式会社 統合情報技術部 (〒102-8539 東京都千代田区麹町 5-4)

E-mail: a6059@n-koei.co.jp

<sup>2</sup>正会員 工博 慶應義塾大学政策メディア研究科助教(〒252-8520 藤沢市遠藤 5322)

E-mail: yan@sfc.keio.ac.jp

エクセルギーは、熱エネルギーが仕事する能力を評価する指標である。この概念を用いると、地域の熱環境を高温化させる要因と、それを抑制する要因を特定し、エネルギー量を用いて地域熱環境の収支バランスを定量化することができる。本研究は慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスを対象地として、放射温度計で表面温度を、気温計で環境温度を 24 時間連続観測し、さまざまな環境要素の放射エクセルギーを計算し、地域全体のエクセルギー収支バランスを評価し、その空間分布を示すクリママップを作成した。その結果、対象地では昼間において人工的な土地（建物、道路）から温エクセルギー放射が著しく、1日に400万kJもの熱が放出されており、自然的な土地（樹林や水面）からの冷エクセルギー放射は1日に100万kJと少なく、地域全体では都市ヒートアイランドを増大させる状況にあることが確認された。

*Key word :* exergy, urban heat island, regional thermal environment, ecological map, GIS, climatic map

## 1. はじめに

都市や地域には大小・形態・用途の異なるさまざまな土地や建物があり、それぞれは独特な環境システムを形成している。緑地や水面などの自然的な土地と、道路や宅地などの人工的な土地は異なる熱特性をもつ。このような地表面の環境構造の違いが熱環境に地域差をもたらし、都市ヒートアイランドが発生する原因となっている。

都市において、建物や緑地や水面などの環境要素が、地域の熱環境やヒートアイランド現象を形成または緩和するなかでどのような働きをしているかを知ることは、都市の土地利用計画や熱環境を制御するうえで、大きな意義をもつ。都市気候学では、気温や表面温度を観測し、地表面エネルギー交換モデルを用いて、気温分布をメッシュベースでシミュレーションする研究が多い。その結果から温度の分布や時間変化を考察することができるが、環境要素の間のエネルギー交換のプロセスおよび効果を空間要素別に捉えて評価することは少なかった。

熱工学では物体や装置の持つ熱エネルギーが仕事する能力をエクセルギーと呼んでいる<sup>1)</sup>。都市におけるさまざまな環境要素は熱を吸収したり排出したりすることから、その働きもエクセルギーで表せると考える。それによって、緑地や水面などのヒートアイランドを緩和させる効果、建物や道路などのヒートアイランドを増大させる効果をエネルギー量によって捉え、地域の熱環境の収支バランスを評価することができるようになる。

以上の考えをもとに、本研究はエクセルギーの概念を用いて地域の熱環境を総合的に評価する方法を提案する

ことが目的である。そのために、まず土地被覆をGISでエコトープへ詳細に区分し、地表面の環境構造をエコマップとして表すことにした。そして、サーモグラフィでそれぞれのエコトープの温度特性を観測し、同時に気温計で環境温度を測定した。エコトープの表面温度と環境温度との差から放射エクセルギーを計算し、地域全体の熱収支バランスを評価した。最後にエコトープをそのエクセルギー特性に応じて統合を行い、地域の放射エクセルギー特性をあらわすクリママップを作成した。

## 2. 研究方法

### (1) エクセルギーの概念

熱工学では、温度の高い物体から温度の低い周辺環境へ熱が拡散されることを温エクセルギー、温度の低い物体が温度の高い周辺環境から熱を吸収することを冷エクセルギーがそれぞれ消費されるという<sup>1)</sup>。この概念は都市におけるさまざまな土地が熱を吸収または拡散する現象にも適用できる。エクセルギーは物体の密度、比熱、容積、環境温度との差によって評価される。本研究では、物体表面からの熱放射エクセルギーを計算するために、高橋ら<sup>2)</sup>が用いた式(1)を用いることにした。

$$E_x = \frac{eh(T_i - T_0)^2}{2T_m} \quad (1)$$

ただし、 $h = 4\sigma T_m^3$ 、 $T_m = \frac{T_i + T_0}{2}$ 、 $E_x$ は放射エクセルギー

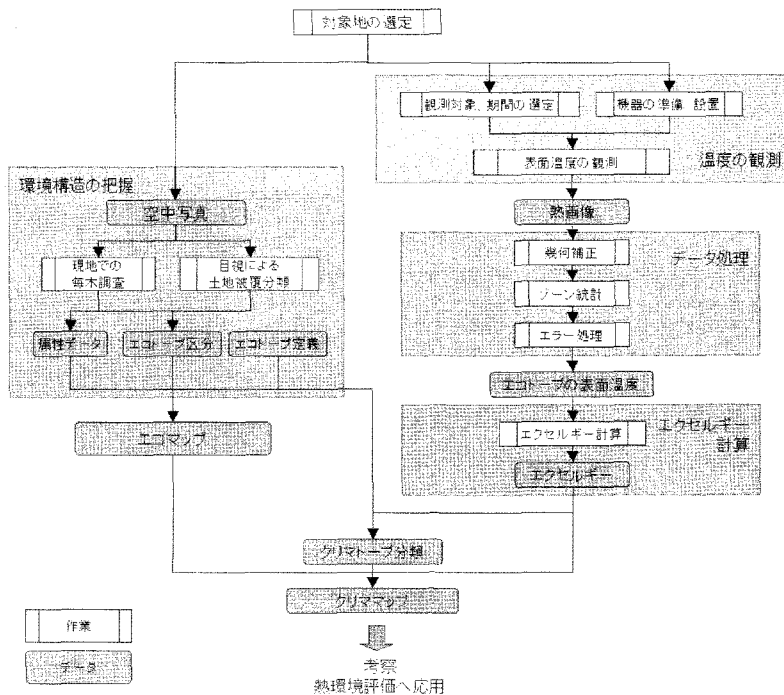


図-1 研究の流れ

ルギー ( $W/m^2$ ),  $e$  は放射率 (ここで, 1 とした),  $\sigma$  はシュテファン・ボルツマン定数 ( $5.67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$ ),  $T_0$  は環境温度 (K),  $T_s$  は表面温度 (K) である。

## (2) 研究方法

研究は図-1に示す流れで進めることにした。まず対象地域の土地被覆を分類し、地表面の環境構造を示す詳細なエコマップを作成した。ここでは、それぞれの土地被覆の種類をエコトープといい、あるエコトープに属する一つの同質の領域はパッチという。エコマップは空中写真を目視で判読して作成した。そして、サーモグラフィを用いて、地表面や建物表面の温度を高所から連続的に測定した。測定した表面温度をエコマップと位置合わせをして、それぞれのパッチの表面温度の平均値を計算した。それによってパッチの温度特性を表す温度マップをつくった。表面温度の観測と同時に、対象地内の各エコトープを代表する地点において、地上気温(高さ2m前後)も測定し、式(1)に必要な環境温度 $T_0$ とした。

以上で取得したパッチの時間ごとの表面温度 $T_s$ と同時

刻の環境温度 $T_0$ を式(1)に代入し、パッチ別時刻別の放射

エクセルギーを計算することができる。熱を吸収するパッチのエクセルギーを冷エクセルギー(負)、熱を拡散するパッチのエクセルギーを温エクセルギー(正)とし、両者を合計したものを地域の熱収支バランスとした。合計値が正ならば、当該地域は熱を拡散し、都市ヒートアイランドを促進する効果があることを表し、合計値が負ならば、当該地域は熱を吸収し、都市ヒートアイランドを緩和する効果があることを表すことになる。最後に放射エクセルギーの類似するパッチをエコトープ別に統合して、地域の放射エクセルギーの特性を示すクリママップをつくった。

## 3. データの処理

### (1) 対象地の選定

研究対象地区は、神奈川県藤沢市の北西部に位置する、慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス(以下SFC, 1990年開設、総面積約32ha)とした。対象地には郊外に位置するが、開設以前からある保存林、建設時に作られた人工林、修景池や遊水地などの水域、大小さまざまな建造物など、いくつもの土地被覆がコンパクトに混ざり合い、今回の調査に適していると判断した。

### (2) エコマップの作成

地表面の環境構造を捉えるために、対象地域の空中写真(縮尺約1/5000, 2000年8月撮影)を目視と現地踏査に

表-1 土地被覆の区分とエコトープの設定

カテゴリ	エコトープ	説明
建築物	建物(高)	3階建て以上の建物
	建物(低)	2階建て以下の建物
舗装面	道路	アスファルト舗装の道路および駐車場
	歩道	タイルなどで覆われた歩道
	その他	テニスコートなど上記に含まれない舗装面
裸地	グラウンド	土に覆われたグラウンド
	砂利	砂利を敷き詰めた駐車場
草地	芝地	手入れされた芝地
	草地	遊水地内のヨシ・ミゾソバ群落など、シバ以外の草地
単木	単木	街路樹などの単木
森林	森林	保存林や植林地などの、まとまった樹林帯
水面	水面	遊水地およびプールなどの開放水面

よってエコトープに分類し、GISソフトArcView8.3上でエコマップを作成した<sup>3)</sup>。土地被覆の区分については、まず大きく建築物、舗装面、裸地、草地、単木、森林、水面の7項目にした。そして、建築物は高さによって二分類した。舗装面は、舗装材料に着目して、アスファルト舗装の道路や駐車場、タイルなどで作られた歩道のほか、その他の舗装面に分けた。裸地は表面の被覆によって土のグラウンドと砂利面の2つに、草地は芝地とそれ以外の草地とに分けた。芝地以外の草地としては遊水地内にできた湿性草地などがある。このように熱環境形成への影響の違いを考慮して表-1に示す12区分にした。また、森林は林分ごとに区分し、樹高(3区分)、優占種、葉面積指数を属性としてエコマップに入力した。単木にも樹高と樹種データを持たせ、図-2は表-1をもとにつくられたエコマップである。

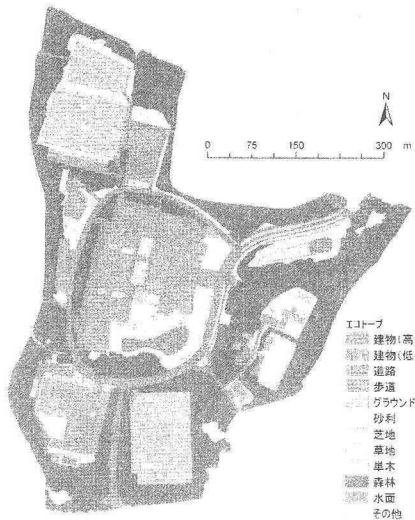


図-2 対象地域とエコマップ

### (3) 温度データの観測

それぞれのエコトープの熱特性を捉えるため、放射温度計で屋上から表面温度の実測を行なった。エクセルギーの評価に必要な環境温度(気温)は百葉箱に置いた温度計で同時に測定した。表面温度については、夏季の一日の表面温度の変化を捉えるために、2003年9月1日7時40分から2日7時40分までの24時間にわたって実測した。できるだけ多くの種類のパッチを観測できるように、対象地内で最も高い建物の屋上に放射温度計(日本アビオニクス株式会社、ネオサーモTVS-620)を設置した。屋上に三脚を固定し、カメラをやや下向きに固定して、水平方向に30°ずつ回転して、合計8枚の熱画像を撮影するという作業を20分おきに行なった。観測中の22時40分から23時20分までの間、降雨のため一時観測を中断した。それ以外の時間について、8方向に70枚ずつ、合計560枚の熱画像を撮影した。撮影した熱画像の一例を図-3に示した。熱画像の表示とビットマップ形式への出力は使用した熱赤外サーモグラフィ専用ソフトTVR-2000で行った。

熱画像からパッチごとに表面温度を計算するため、まず熱画像をすべてグレースケールとして保存し、ERDAS Imagineを用いて幾何補正を行ない、同方向を撮影した熱画像がGISの画面上で重なるようにした。ArcView8.3において、補正した熱画像を観測方向ごとに表示し、観測対象とするパッチを画像上でトレースして輪郭の図形ファイルを作成した。作成したパッチごとに、以下の式(2)を用いて、ピクセル値から表面温度を計算した。

$$T_i = \frac{DC}{\Delta_T} + T_{\min} \quad (2)$$

ただし、 $T_i$ はあるパッチの表面温度、 $DC$ はパッチ内の

平均ピクセル値、 $\Delta_T$ は熱画像の表示温度範囲、 $T_{\min}$ は熱画像の表示最低温度値。

以上のように計算したパッチごとの表面温度をエコトープ別に平均した。表面温度の観測データには操作時の



図-3 観測した熱画像の例

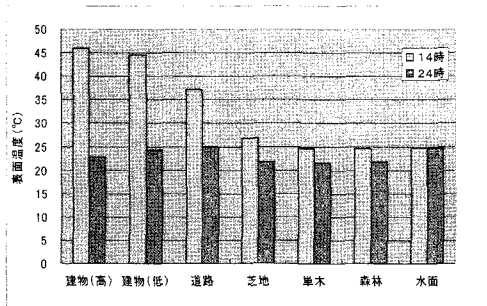


図-4 エコトープ別の表面温度測定値

ミスなどによってエラーがあったため、目視で異常値を抽出・除去し、前後との平均値を挿入した。さらに、1時間ごとに平均して平滑化した。継続的に挙動のおかしかった早朝 2:00~5:20 までの値もすべて削除した。建物と道路以外の 18:00~18:40 のデータも同様の理由で削除した。このように表面温度を処理し、エコトープごとの

24 時間 20 分おきの表面温度を算出した。図-4 は 14 時と 24 時のエコトープ別の表面温度値を示している。

環境温度については、対象地内の芝生の上に設置した白菜箱の結果を利用した。観測当日は 15 時~16 時あたりで気温のピークがあった。最高気温は約 28℃、最低気温は約 22℃であった。

#### (4) エクセルギーの計算

表面温度と気温データから式(1)を使って、パッチごとの放射エクセルギーの値を計算した (図-5 参照)。

パッチごとの計算値をエコトープの平均値へ統合するために、14 時のエクセルギー値を横軸に、24 時のエクセルギー値を縦軸に図-6 に示す散布図をつくった。また、森林や芝地などは放射エクセルギーが小さいため、原点付近に集中した。そのなかの分布を明示するために原点付近を図-7 に拡大した。

図-6 から建物(高)、建物(低)、道路、水面の 4 種類のエコトープが、それぞれ独特の放射エクセルギー特性

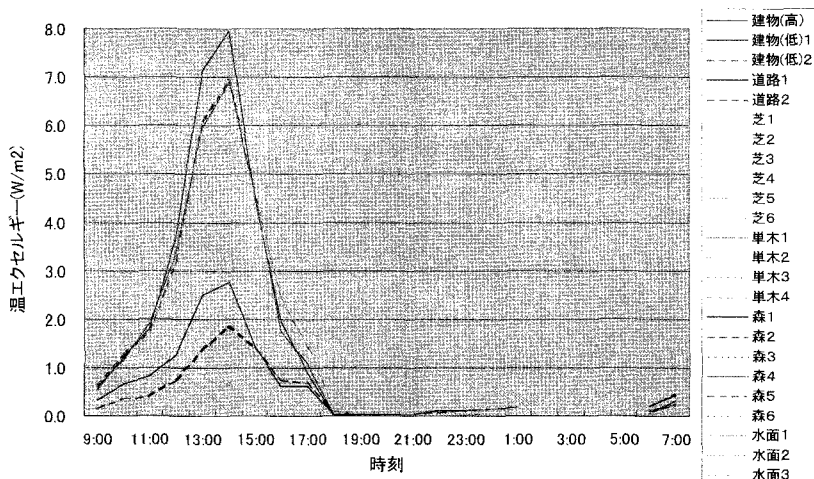


図-5 パッチごとに計算した放射エクセルギー

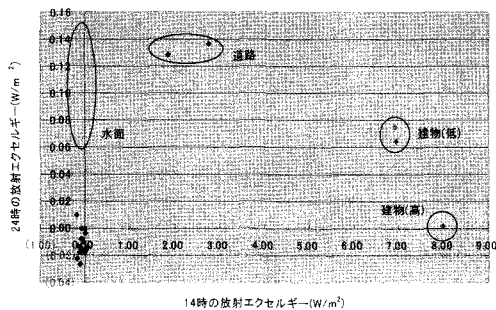


図-6 エコトープ別の放射エクセルギー

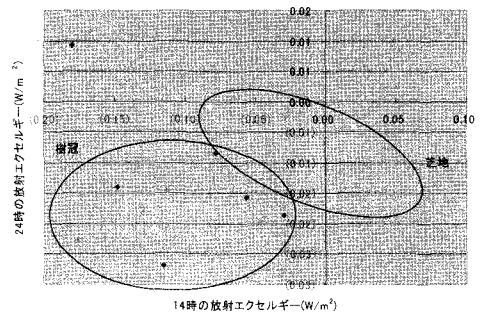


図-7 左図の原点付近の拡大

を持っていることがわかる。これら4種類のエコトープを熱環境の観点から有意義な区分とした。植生にかかわる部分については、表面温度の観測では樹冠、芝地、単木などサンプルを取ったが、図-7からわかるように明快な傾向がみられなかったため、芝地と林地(樹冠)の二つにまとめた。これにより、建物(高)、建物(低)、道路、水面、樹林、芝地という6つのエコトープをもつ熱環境マップを定義した。これら6つのエコトープの放射エクセルギーの特性を表-2にまとめた。

定義した6つのエコトープの、一日の放射エクセルギーを表-3にまとめた。建物と道路は一日通して温エクセルギーを、芝地と樹冠のクリマトープは冷エクセルギーを、水面は日中には冷エクセルギー、夜間には温エクセルギーを放射する特性を示している。

積算すると、温エクセルギーは約400万kJ、冷エクセルギーは約100万kJとなり、温エクセルギーが4倍近く放射されている。今回の対象地のように、樹冠の面積が45%と広い場所であっても温エクセルギーが冷エクセルギーと比べて非常に大きく、人工物の熱環境への影響の強さが示された。

一日を通して最も大きな温エクセルギーを放射していたのが建物で、特に3階以上の建物は日中の表面温度が高く、放射エクセルギーの値も大きかった。これは、容積率の高い建物のほうが、窓からの透過日射や壁面の日射受熱量が大きい上、建物利用による室内での発熱量が多いことと、観測対象とした5階建ての建物は東向きガラス面の面積が広く、建物内部に熱が貯まりやすい構造になっているためと推測される。

表-2 エコトープ別の放射エクセルギー特性

	温エクセルギーを放射した時間(h)	平均温エクセルギー(W/m <sup>2</sup> )	温エクセルギー(J/m <sup>2</sup> /日)	冷エクセルギーを放射した時間(h)	平均冷エクセルギー(W/m <sup>2</sup> )	冷エクセルギー(J/m <sup>2</sup> /日)
建物(高)	16	1.88	108,000	3	0.00	281
建物(低)	18	1.58	103,000	1	0.00	6
道路	19	0.54	37,200	0	0	0
芝地	2	0.01	76	16	0.04	3,280
樹冠	0	0	0	18	0.00	7,350
水面	9	0.05	1,560	9	0.03	2,170
全域			17,500			4,670

#### 4. 考察

約30haの対象地において、放射エクセルギーを一日で

日没後の18時ごろから温エクセルギーは非常に小さくなり、対象地全体として、温エクセルギーよりも冷エクセルギーの放射量のほうが多い時間帯もあった。冷エ

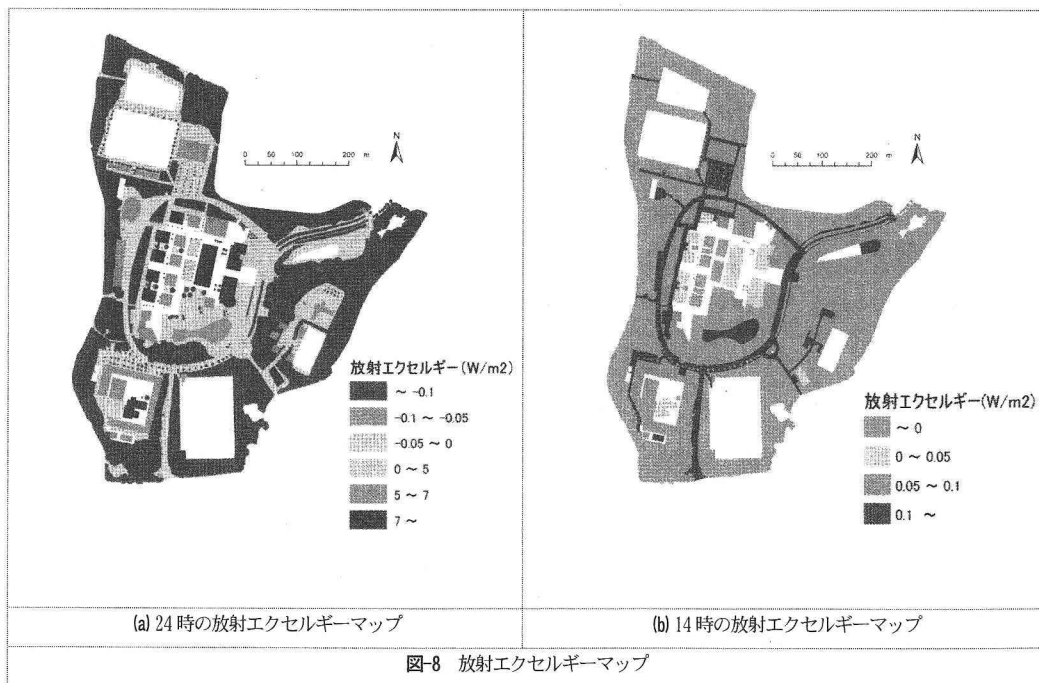


表-3 対象地から一日に放射されるエクセルギー

	面積 (m <sup>2</sup> )	割合	温エクセル ギー (千 kJ)	冷エクセル ギー (千 kJ)
建物 (高)	10680	3%	1,154	3
建物 (低)	19844	6%	2,035	0
道路	33218	11%	1,235	0
芝地	48227	16%	4	158
樹冠	138153	45%	0	1,016
水面	3288	1%	5	7
全域	253410	82%	4,434	1,185

クセルギーは主に樹冠から放出されており、樹冠は特に日中に安定して冷エクセルギーを放射している。一方、15時から22時ごろには芝地からの冷エクセルギーが大きい。昼間の冷却効果をねらうならば樹木、夜間の冷却効果をねらうならば芝地を広く設置することが有効であると考えられる。

## 5. 結論と課題

放射エクセルギーという指標を用いて熱環境を評価することで、夏季の昼間の高温化に寄与する土地と、冷却効果をもつ土地を特定し、地域全体のエクセルギー収支を定量的に定量的に評価することができた。これを都市域全体に適用すると、エクセルギー収支の黒字の地域（ヒートアイランドの発達に増幅する地域）、エクセルギー収支の赤字の地域（ヒートアイランドの発達に抑制する地域）を区分することができ、都市計画の熱環境対策の立案と効果の検証に利用できることがわかった。

## The assessment of regional thermal environment with the concept of exergy

Aya Matsuzaki<sup>1</sup> and Wanglin YAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Nippon koei Co., Ltd

<sup>2</sup>Faculty of Environmental Information, Keio University

Exergy expresses the possible work that could be transferred from the heat energy of a body. This concept could be used for assessing the balance of heat energy in a region by distinguishing the factors warming up air temperature and those cooling down air temperature. This study, taking Shonan Fujisawa Campus of Keio University as a study area, attempts to propose a new indicator with the concept of exergy for expressing the regional thermal environment spatially and comprehensively. We made an ecological map which expresses the environmental structure of the earth surface and measured the daily change of the surface temperatures in each 20 minutes from the top of the highest building within the site with thermal recorder. Based on the measurement, the surface temperature were mapped to the ecological map as the thermal attributes of each patch and the exergy was calculated with the difference of the surface temperature and the environmental air temperature. The results show that the radioactive exergy from buildings and roads are extremely bigger as 4 millions KJ a day but the absorptive exergy by vegetation and water bodies are smaller as 1 million KJ. This illustrates that the study site displays the potential of strengthening the urban heat island.

今後は、都市計画上の政策指標としての実用化にむけて、エクセルギーの有効性をさらに検討する。都心部など今回の対象地とは環境条件が異なる地域での観測や衛星画像を用いた広域の観測を継続し、エクセルギーによる評価を行なうことで、指標の有用性や制約などを確認するとともに、さまざまな緑地や地域のエクセルギー特性を明らかにしていきたい。

**謝辞：**本研究は平成15年度慶應義塾学事振興基金による研究助成を受けて行ったものである。地図データの作成や温度データの連続観測に慶應義塾大学蔵研究室の学生の皆さんに多大な協力を頂いた。ここに感謝をあらわす次第である。

## 参考文献

- 1) 宿谷 昌則, 1999, 自然共生建築を求めて, 鹿島出版会.
- 2) 高橋達, 近藤大翼, 伊澤康一, 宿谷昌則, 放射エクセルギーの計算方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p487-488, 2000.
- 3) Wanglin YAN and Aya Matsuzaki, Mapping the Spatial Structure of Urban Ecosystems and Calculating the Value of Trees in Yokohama City, presented at The 8th Inter-university Seminar on Asian Megacities, Beijing, China, 15-16, 2003.
- 4) 環境庁大気保全局大気生活環境室: ヒートアイランド対策の推進のために, 2000.