

上海市における人工排熱について

Anthropogenic Heat Emission in Shanghai City

白 迎玖* 一ノ瀬 俊明**

Yingjiu BAI* and Toshiaki ICHINOSE**

ABSTRACT; Anthropogenic heat emission has been well documented and researched in developed countries as one of the major factors causing heat island phenomenon. As economic development, urbanization and population growth continue in the developing countries, increase in anthropogenic heat has continued. It will effect on urban heat islands in the developing countries deeply in the 21st century. However, quantitative analysis of anthropogenic heat and its impacts in developing countries are rare because of a deficiency in energy consumption statistics. This paper purposes pursuing an approach to evaluate anthropogenic heat in the large cities in developing countries, focused on evaluating anthropogenic heat and clarifying its effects on urban heat islands in Shanghai, which is the largest commercial and industrial city in China. We defined a method of estimating anthropogenic heat emission from energy consumption statistics in 14 wards within Shanghai City, applying studies on calculating energy consumption in Tokyo. As a result, urban anthropogenic heat emission from industrial estate and a dense population have affected on urban heat islands in Shanghai. In addition, our research shows that the process of a much larger project in Shanghai's Pudong Development Zone has been involved the distribution of urban heat islands in Shanghai

KEYWORDS; Shanghai, anthropogenic heat emission, urban heat island, energy consumption

1. はじめに

近年、途上国において都市化に伴う都市ヒートアイランド（UHI: Urban Heat Island）現象が顕在化している¹⁾。高温化のため、都市生活を不快なものにするだけでなく、夏季のエアコン利用によるエネルギー消費量の増加をもたらし、人工排熱の増加と二酸化炭素の発生増という悪循環に陥るなど、様々な問題を発生させてきた²⁾。上海気象局のレポート（1998）によると、中国最大の商工業都市である上海においてもこの現象は顕著になっている³⁾。

これまで、主に先進国における事例研究によって、都市の人工排熱、特に夜間の相当量の人工排熱が熱帯夜に大きく影響していることが明らかにされている⁴⁾。上海では1990年代に入り改革開放経済のもとで急激な開発が行われ、都市部ではエネルギー消費量が大幅に増大し（図1）、またコンクリート建築物や舗装道路の増加による蓄熱効果のため、UHIが著しくなっている¹⁾。上海は21世紀における世界経済の成長の中心と目されており⁵⁾、エネルギー消費量は今後も増加し続けると予測されている⁶⁾。ことから、このままでは将来UHIが一層拡大することは避けられない。これに対して早期に効果的な対策をとるためにも、エネルギー消費に伴う人工排熱とUHIとの関係の分析が急務であると言える。

日本では、都市の人工排熱の構造及び時空間変動に関する研究が進んでいる。一ノ瀬⁷⁾は東京23区を対

* 慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科 Graduate School of Media and Governance, Keio University

** 国立環境研究所地球環境研究センター Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

象として、エネルギー消費原単位を業種別、用途別、燃料種別に算定するとともに、原単位の季節的、時間的変化をも推定した。また、河原ら⁸⁾は土地利用現況調査結果や道路交通センサスなどに基づき、東京 23 区において、2010 年時点での熱源別、用途別の人工排熱量を推計した。一方、アジアの中では中国が最大のエネルギー消費国であり⁹⁾、環境問題の視点で中国のエネルギー消費構造に関する研究^{9,10)}が行われているが、地域別（中国における行政区、区別）や用途別などのエネルギー統計が十分に整備されてないので、人工排熱に関する研究、とりわけ、その原単位を算出した例は限られている。特に、中国では、人工排熱の空間分布を把握するための土地利用現況、道路交通、家庭エネルギー消費などの調査を行うことが容易ではない。そこで本研究においては、各種の統計データ¹¹⁻¹⁴⁾を活用することにより、まず上海市における部門別のエネルギー消費の原単位を推定し、さらに市内の各区ごとの消費量を推計し、その結果に基づいて、UHI と都市の人工排熱との関係の分析を行った。

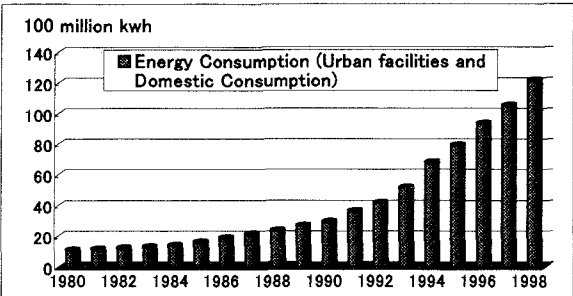


図1 1980-1998 上海市における都市部でのエネルギー消費の増加（『上海統計年鑑 1999』¹¹⁾ のデータより作成）

2. エネルギー消費量の統計データについて

従来、人工排熱量はエネルギー消費量を熱量換算して求めてきた。中国におけるエネルギー消費量のデータは、あらかじめ部門（業種）毎に集計された形で提供されている。『中国能源統計年鑑 1991』¹⁵⁾により、エネルギー消費部門は、物質生産部門と非物質生産部門および生活消費部門に大別される。このうち物質生産部門は農・林・牧・漁業、工業、建築業、交通運輸・倉庫・郵便通信業、卸・小売貿易飲食業より構成される（表1、表2には日本における最終エネルギー消費構造の部門別を示す）。

表1 中国におけるエネルギー消費統計の分類項目

エネルギー消費部門	業 種
物質生産部門	第1次産業：農・林・牧・漁業
	第2次産業：工業 (採掘業、製造業、電力、ガス及び水生産・供給業など) 建築業
	第3次産業：交通運輸、倉庫および郵便通信業 卸・小売貿易飲食業 その他のサービス業種
非物質生産部門	その他の部門（例えば、政府の各級行政管理部門、党の組織・機関など）
生活消費部門	家庭用

『中国能源統計年鑑 1991』より作成

表2 日本における最終エネルギー消費構造の部門別の分類項目

民生部門		運輸部門		産業部門				
家庭用	業務用	自動車	その他	鉄鋼	化学	その他製造業	その他	非エネルギー

『総合エネルギー統計（平成 11 年度版）』¹⁶⁾より作成

地域別（省級行政区別）のエネルギー消費量のデータは『地域別統計年鑑』（例えば、『上海統計年鑑』、『広東省統計年鑑』などがある）に収録されており、生産消費と生活消費の2つの項目に分類されている。また、中国の統計資料には、標準炭（SCE）の発熱率を標準として、各業種の最終エネルギー消費量のデータは標準炭に換算されている。最近、中国の統計年鑑に基づいて、『中国富力』（97,99年版）という日本語版の中国省級行政区別の統計年鑑も出版された¹³⁾。表1と表2を比べると、中国のエネルギー消費量を部門別で集計する方法は日本と違うことがわかった。また、日本における最終エネルギー消費構造の割合図（図2）によって、産業部門によるエネルギー消費が全体の50%以下になっている。中国の都市においては、工業生産による最終エネルギー消費構造の割合（図3に示す）は日本と部分的に異なっており、さらに、第2次産業（工業と建築業）による最終エネルギー消費はかなり高い割合（70%以上）になっている。中国の都市は自動車の数が日本の都市より相対的に少ないので、現時点では運輸部門のエネルギー消費の割合が日本より少なかったのである。従って、日本の既存研究手法^{7,8,17,18)}を利用して原単位を推定する際、表3による上海のエネルギー消費構造の特徴、および統計データの属性を考慮する必要がある。

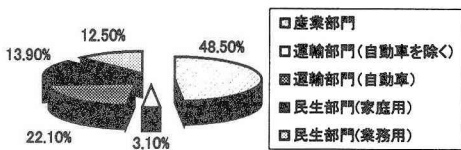


図2 日本における部門別の最終エネルギー消費構造の割合
『総合エネルギー統計(平成11年度版)』より作成

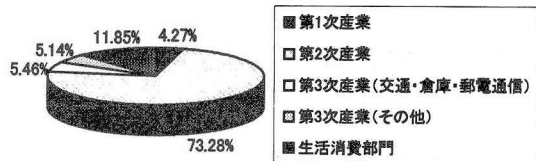


図3 中国における産業別の最終エネルギー消費構造の割合
『中国統計年鑑1999』(注1)により作成

表3 上海における産業別の最終エネルギー消費構造の割合

生産消費					生活消費部門
第1次産業	第2次産業	第3次産業			
農・林・牧・漁業	工業と建築業	交通運輸、倉庫及び郵便通信業	卸・小売貿易飲食業	その他	
1.98%	70.77%	9.98%	2.32%	5.69%	
					9.27%

『上海統計年鑑 1999』より作成

3. 上海市の各区ごとの年間エネルギー消費量

上海市には16の直轄行政区（1998年）があるが（図2）、本研究においては市内の10の行政区（黄浦区、南市区、芦湾区、徐匯区、長寧区、静安区、普陀区、閘北区、虹口区、楊浦区）と、近郊の4区（浦東新区、閔行区、宝山区、嘉定区）を対象とした。

本研究で対象とした業種は工業・建築業（表3の第2次産業）、家庭（表3の生活消費部門）、自動車による交通、商業、業務（表3の第3次産業）である。エネルギー消費原単位、交通量などは文献資料⁸⁻¹¹⁾を用いた。（都市部および近郊では第1次産業が殆どないので、本研究は第1次産業によるエネルギー消費量を無視した。）

3. 1 工業・建築業エネルギー消費量

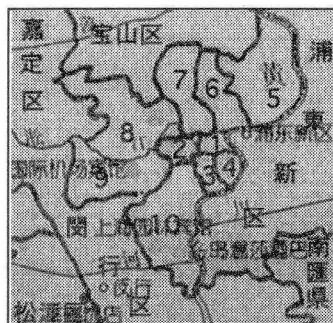
上海は中国第一の商工業都市であり、解放後（1949年～）には多くの工場が建てられ、現在も多くの経済開発区が設置されている。総生産量の中で工業の生産値（億元）は依然として一位を占めている（1998年は50.1%）。最終エネルギー消費量においても70%以上を占めている。工業生産は上海のエネルギー消費

に多大な影響を与えていることが分かる。

上 海



上海市内



行政上は、上海は 16 の市直轄区と 4 県で構成されている（1998）。16 の市直轄区が郊外の 2 区（松江区と金山区）、近郊の 4 区、10 の市区（1：黄浦区 2：静安区 3：芦湾区 4：南市区 5：楊浦区 6：虹口区 7：閘北区 8：普陀区 9：長寧区 10：徐匯区）に分かれている。

図 4 上海の行政区画

掲載された地域（行政区）別の工業生産に関するエネルギー消費資料が少ないので、本研究では参考文献^{11,13)}により上海市の工業・建築業の総生産（第 2 次産業総生産、単位：億元）一単位当たりの最終エネルギー消費量を推定し、次式を用いて各区ごとの工業・建築業エネルギー消費量を算出した。ここで、第 2 次産業に所属する各業種における総生産一単位当たりの最終エネルギー消費量の差は無視して計算した。なお 1998 年の場合は、工業・建築業の最終エネルギー消費量の中で建築業用は 2.28% しか占めなかったもので、工業・建築業用エネルギー消費量はそのまま工業用エネルギー消費量と見なして差し支えないと思われる。

$$\begin{aligned} \text{各区ごとの工業・建築業エネルギー消費量[標準炭]} = & \\ & \text{各区ごとの第 2 次産業総生産一単位当たりの最終エネルギー消費量[標準炭/億元]} \\ & \times \text{各区における第 2 次産業総生産[億元]} \end{aligned}$$

3. 2 家庭用（生活消費部門）エネルギー消費量

家庭用エネルギー消費量については統計資料が比較的整っている。世帯数およびエネルギー消費原単位は単身世帯、3 人世帯（一人子家庭）と 3 人以上の世帯（3 世の家庭）の区別がされていないので、本研究において家庭用エネルギー消費量は、1998 年の統計データから得られる各区ごとの人口と、上海市の一人当たり年間平均生活用エネルギー消費量を乗じて求めた。

3. 3 交通運輸によるエネルギー消費量

日本では、自動車および鉄道についてのエネルギー消費原単位は、走行燃費や人キロ、トンキロによる原

単位についても、統計資料は比較的整っている¹⁰⁾。特に、地域毎の自動車も走行距離や輸送実績のデータも「自動車輸送統計年報」（運輸省）などにみることができる。しかし、途上国である中国の場合は、このような、データベースが整備されてない。さらに、部門別に関する燃料の統計資料、及び地域において交通量データが全くないので、走行距離原単位を推計することは困難である。これらの問題を解決するため、本研究は入手可能な最新版の『上海地図集』¹⁴⁾により、上海における各区ごとの交通量（7:00-17:00）データ、及び路線長データを利用して走行距離原単位を推定した（式①）。式②により各区ごとの交通によるエネルギー消費量を算出した。『上海地図集』による交通量のデータが不十分なので、本研究では、交通運輸部門におけるエネルギー消費は主に自動車によるものと見なした。

自動車の走行距離原単位[標準炭/キロ]=
自動車によるエネルギー消費[標準炭]÷
{自動車の交通量[台/日]×路線長[キロ]×365} ①

各区ごとの交通運輸によるエネルギー消費[標準炭]=各区ごとの {
自動車の原単位[標準炭/キロ]×自動車の交通量[台/日]×路線長[キロ]×365 } ②

なお、用いた交通量データには普通車と大型車の区別がないため、本研究では普通車の原単位と大型車の原単位とを区別していない。また、対象路線は、上海市区の主要路線（1996 年）のみである。データの年度を統一することが望ましいが、上海における 1998 年の路線データの出版が遅れているため、本稿の交通量が 1998 年のものに補正することができなかった。

3. 4 卸・小売、貿易、飲食業からのエネルギー消費量

本研究では参考文献^{11,13)}により上海市における卸・小売、貿易、飲食業の販売総額一単位当たりの最終エネルギー消費量を推定し、各区ごとの卸・小売、貿易、飲食業エネルギー消費量は卸・小売、貿易、飲食業原単位と、各区ごとの卸・小売、貿易、飲食業の販売額を乗じて算出した。

3. 5 業務用エネルギー消費量

中国の統計年鑑には「業務用」という部門・業種がないので、本研究では、上海における統計データの中に掲載された第 3 次産業の「その他」のデータによるものと見なした。また、上野ら¹⁷⁾の研究から、事業所からの排熱は、数値情報から得られる各業種ごとの事業所数と、平均床面積とエネルギー消費原単位を乗じて算出することが考えられた。

しかし、業務用建築物の種類は多く、エネルギー使用状況も多様である。従って、原単位を計算するには、多様な統計資料を利用し、さらに、建築物のエネルギー消費について研究対象地域で調査を行うべきである⁸⁾。現時点は、上海では建物別のエネルギー消費量に関する調査を行うことが不可能で、本研究は、守田（1996）の研究により、業務用のエネルギー消費原単位の設定値（表 4）¹⁰⁾を用いて、上海市の業務用エネルギー消費原単位の比率を設定した。

表 4 業務用エネルギー消費原単位（設定値：W/m²）^{注2}

	事務所	病院	ホテル	教育文化	娯楽	飲食店
原単位(W/m ²)	25	55	60	15	50	90

今回は業務用がホテル、病院、事務所、教育文化、娯楽の各施設によるものと見なした。また、日本と違

い、上海では通常暖房機器は使用しないこと、大学生および多くの教員は学校の寮に生活することを検討した。ここで、計算の便利さで表 4 のホテルの原単位は 1 単位にした。それにより、上海市の業務用エネルギー消費原単位の比率を推計した（表 5）。参考文献¹¹⁾から建物別の床面積データと業務用エネルギー消費量の合計値を用いて、ホテルの原単位を算出した（式③、④）。式⑤により、各区ごとの業務用エネルギー消費量を算出した。

表 5 上海市の業務用エネルギー消費原単位（設定値：W/m²）の比率の設定

	事務所	病院	ホテル	教育文化	娯楽
用途*	冷房、給湯、電力	冷房、暖房給湯、電力	冷房、暖房、給湯、電力	給湯、電力	冷房、電力
業務用原単位（W/m ² ）の比率の設定	1/3	1	1	1/3	2/3

*上海では通常暖房機器は使用しない。

$$\begin{aligned} \text{ホテルのエネルギー消費量} &= \text{業務用エネルギー消費量} - \text{事務所の原単位} \times \text{床面積} - \text{病院} \\ &\quad \text{の原単位} \times \text{床面積} - \text{教育文化の原単位} \times \text{床面積} - \text{娯楽の原単位} \times \text{床面積} \end{aligned} \tag{③}$$

$$\begin{aligned} \text{ホテルの原単位} [\text{標準炭}/\text{m}^2] &= \\ \text{ホテルのエネルギー消費量} [\text{標準炭}] \div \text{床面積} [\text{m}^2] \end{aligned} \tag{④}$$

$$\begin{aligned} \text{各区ごとの事務用エネルギー消費} &= \text{各区ごとの} \{ \text{事務所の原単位} \times \text{床面積} + \\ &\quad \text{病院の原単位} \times \text{床面積} + \text{教育文化の原単位} \times \text{床面積} + \text{娯楽の原単位} \times \text{床面積} \} \end{aligned} \tag{⑤}$$

4. 結果および考察

本研究の結果について、表 6 に上海市内の各区における業種・部門別の年間人工排熱量を示す。全体では、工業・建築業排熱が最も大きく、次いで家庭用、交通、業務用、商業と続いている。14 の区の中では、浦東新区が人工排熱量が一番多く、近郊の 4 区の人工排熱量は市内の 10 区より多かった。これは、区の面積の大きさが違い、浦東新区をはじめ近郊には急速な経済発展が進んでおり、さらに、工場の多くが近郊の 4 区に分布しているためであると思われる。また、表 6 にから、市の中心部である黄浦区、静安区、芦湾区、南市区（図 2 の 1,2,3,4）は単位面積あたりの人工排熱が最も多かったことが分かった。

図 5 に上海市における各区の年間単位面積あたりの人工排熱量を示す。これと NOAA データ（1996/7/25）による上海における夏季の熱分布のイメージ図（図 6）¹⁾の比較により、高温地域になっている上海市の中心部は単位面積あたりの人工排熱が最も多かった黄浦区、静安区、芦湾区、南市区である。しかし、本研究においては、各区の年間平均人工排熱量を計算したので、人工排熱の分布と局地の高温域との関係が見られない。また、1999 年 11 月～2000 年 1 月まで、筆者らは上海における秋、冬季のヒートアイランド現象を観測した¹⁹⁾。観測の結果（図 7）により、夜間、都心部にある観測点（図 7 のポイント 5）の気温が郊外により高く、ヒートアイランド現象を良く見られた。これも都心部の単位面積あたりの人工排熱が最も多かったことと関係があると考えられる。

今回示された人工排熱の結果から、浦東新区の人工排熱量が最も多く、単位面積あたりの人工排熱は近郊の 4 区の中ではトップになっているので、今後、浦東新区の局地の気温が高くなる傾向がみえてくるであろう。あるいは、浦東新区の開発に伴い、都心部の高温域は東に拡大することが予測される。

表6 上海市内の14区での業種・部門別の年間排熱量（1998）（単位：万t標準炭）

各区（図2による番号）	年間排熱量(H) (万t標準炭)	工業・ 建築業	家庭 用	商業	業務 用	交通	各区の面積 (S) (km ²)	H/S (万t標準炭/km ²)
黄浦区 (1)	65.0	8.5	8.1	7.5	17.6	23.4	4.54	14.33
南市区 (4)	58.4	8.2	14.6	3.2	10.6	21.8	7.87	7.42
芦湾区 (3)	69.6	10.4	12.0	8.7	16.1	22.3	8.05	8.64
徐匯区 (10)	110.2	18.6	27.7	7.1	34.0	22.8	54.76	2.01
長寧区 (9)	90.1	13.0	20.0	5.8	30.3	20.9	38.30	2.35
静安区 (2)	72.2	11.4	12.2	2.9	25.3	20.5	7.62	9.48
普陀区 (8)	84.4	17.6	27.3	5.2	16.8	17.5	54.83	1.54
閘北区 (7)	72.9	13.4	22.4	5.8	14.1	17.2	29.26	2.49
虹口区 (6)	86.1	12.7	26.1	6.3	22.2	18.8	23.48	3.67
楊浦区 (5)	94.4	15.7	35.3	6.5	17.8	19.1	60.73	1.55
浦東新区	788.5	700.5	51.0	7.4	10.8	18.8	522.75	1.51
閔行区	146.4	100.4	19.4	4.2	6.5	15.8	371.68	0.39
宝山区	128.4	72.4	24.6	5.0	12.1	14.3	415.27	0.31
嘉定区	202.6	156.9	15.5	4.7	11.4	14.2	458.8	0.44
合計	2069.2	1159.7	316.3	80.2	245.5	267.5		

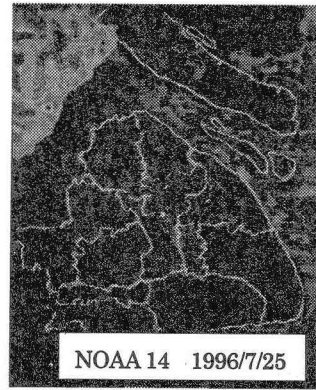
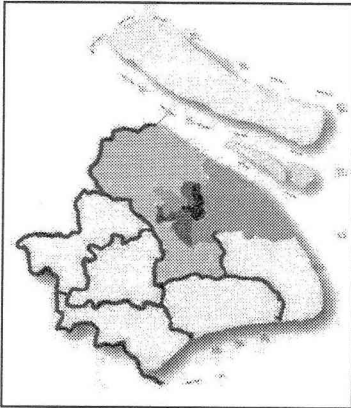


図5 表6による上海市の単位面積あたりの人工排熱分布

図6 上海における熱分布のイメージ図¹⁾

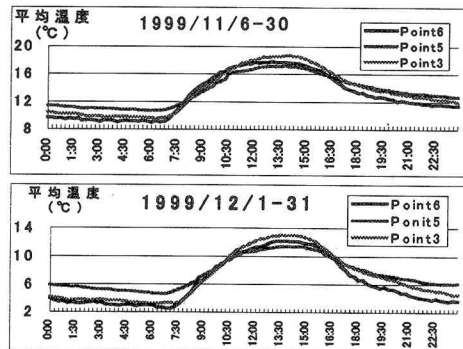
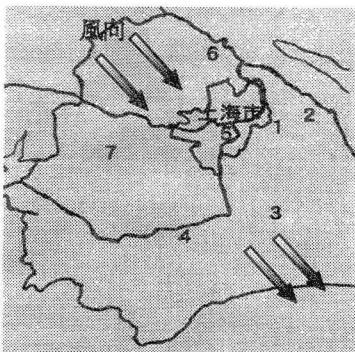


図7 上海における秋、冬季ヒートアイランド現象の観測結果（1999年）

5. おわりに

今回は各種の統計データを活用することにより、上海市における市内の各区ごとの年間エネルギー消費量を推計し、UHI と都市の人工排熱との関係を分析することが試みた。都心部である高温域は単位面積あたりの人工排熱が高いことと関係があった。また、浦東新区の経済発展に伴い、市の中心部にある高温域は、現在開発が激しくなっている浦東新区に拡大する可能性が高いと考えられる。それへの有効な対策としては、市街地の無計画なスプロールの拡大および人工排熱を抑制しながら、都心部および浦東新区に緑地・水辺の区画整理を考慮し、都市の熱環境を改善することが必要である。

また、人工熱の排出が熱環境に与える影響を検討する場合、エネルギー消費の時間変動を計算しなければならない。今後、高解像度のリモートセンシングデータを利用し、データベースや統計データが不十分な開発地域に関して、統計資料を用いたエネルギー消費の原単位を推定する方法を検討する予定である。

謝辞

本稿を進めるにあたり、査読者の方々から有益なコメントを頂いた。ここに心により謝意を表したい。なお、本研究は、科学技術振興事業団戦略的基礎研究「都市ヒートアイランドの計測制御システム」の研究費の一部を使用した。

注

注1：本研究では、使用された『中国統計年鑑 1999』（国家統計局編）の中に、産業別の最終エネルギー消費構造に関するデータは 1997 年のデータであった。

注2：参考文献¹⁸⁾により、表4のデータは『都市環境入門』の中の都市におけるエネルギー代謝からの資料（尾島俊雄著、東海大学出版社 1997）をもとに設定した業務用のエネルギー消費原単位であった。

参考文献

- 1) 周 紅妹, 丁 金才 (1998): 気象衛星在上海市熱場分布動態監測中的应用研究, 大気科研究与应用学, Vol.1, 150-156. (中国語)
- 2) Learning About Urban Heat Islands: What Are Problems with the "Heat Island Effect?" (2000), <http://eande.lbl.gov/HeatIsland/EnergyUse/>
- 3) 上海気象 (1998): 天気気候 (Weather and Climate), 上海市気象局・上海区域気象中心編, Vol.1, 3. (原文: Along with the development of the city, "heat island effects" has become clearer and clearer, and has been the most prominent characteristic of Shanghai.)
- 4) 下堂蘭和宏, 一ノ瀬俊明, 鶴野伊津志, 花木啓祐 (1995): 土地利用および人間活動の都市気候へのインパクト評価 —東京 23 区を例として—, 環境システム, Vol.23, 347-351.
- 5) Shanghai Basic Facts (1998). *China Intercontinental Press*.
- 6) 高 偉俊ら (1999): 上海市のエネルギー構造の変化及び大気環境への影響に関する研究, <http://www.ojima.arch.waseda.ac.jp/~asia/report/Gao2000tokyo.PDF>
- 7) 一ノ瀬俊明, 花木啓祐, 松尾友矩 (1994): 細密地理情報にもとづく都市人工排熱の時空間分布の構造解析, 環境工学研究論文集, 第 31 巻, 263-273.
- 8) 河原能久, 小林裕明, 末次忠司, 木内 豪 (1999): 東京 23 区における人工排熱の時空間分布の推定, 環境システム, Vol.27, 715-720.
- 9) 中国研究所編 (1993): 中国の環境問題 (中国年鑑 1993 年版別冊), 第 1 章 3. エネルギーと環境問題, 11-13.
- 10) 井村秀文, 白土廣信, 藤倉 良 (1994): アジア地域の経済成長とエネルギー消費構造に関する研究, 環

境システム研究, Vol.22,369-375.

11) 上海統計局編 (1999):『上海統計年鑑 1999』, 中国統計出版社.

12) 国家統計局編 (1999):『中国統計年鑑 1999』, 中国統計出版社.

13) 中国国家統計局&株式会社総研企画・編集(1999):『中国富力 99 年版』.

14) 上海市地図編集委員会編 (1997):『上海市地図集』, 上海地図出版社.

15) 国家統計局工業交通統計司編 (1991):『能源統計年鑑 1990』中国統計出版社.

16) 資源エネルギー庁長官官房企画調査課編 (1999):『総合エネルギー統計 (平成 11 年度版)』, 通商産業研究社.

17) 上野賢仁, 井村秀文 (1996):都市熱環境解析システムに関する研究—熊本市のケーススタディー, 環境システム研究, Vol.24,569-573.

18) 守田 優 (1996):都市人工熱源の熱環境負荷原単位について, 環境システム研究, Vol.24,593-600.
究, Vol.20,287-293.

19) 白 迎玖・新津 潔・久保幸夫 (2000):上海におけるヒートアイランドの空間構造(第 1 報), 日本地理学会 2000 年度総会・春季学術大会.