

建物用塗料の塗布によるヒートアイランド緩和及び冷暖房負荷削減方策

A measure for heat island mitigation and reduction of cooling and heating load by building paint

東京大学大学院新領域創成科学研究科

半田隆志

松橋隆治

Takashi HANDA

Ryuji MATSUHASHI

東京大学大学院工学系研究科

石谷久

吉田好邦

井原智彦

六川修一

風間祐介

Hisashi ISHITANI Yoshikuni YOSHIDA Tomohiko IHARA Shuichi ROKUGAWA Yusuke KAZAMA

1、はじめに

都市への人口や産業の集中、いわゆる「都市化」は社会としての利便性、効率性の向上に有効であるが、一方で過度の都市化は様々な弊害をもたらす。その一つがヒートアイランド現象の激化である。日本においても近年東京を始め各都市でヒートアイランド化が進行しており、これによりすでに都市部の住民に熱中症が増えるなど健康に影響が及ぶに至っているほか、大気汚染悪化や都市型集中豪雨増加をももたらしているとも言われており早急な対策が必要とされている。ヒートアイランド現象は、夏期には冷房需要の増大を招きそれがさらなるヒートアイランド化を促進するという悪循環を形成する一方、冬期には逆に暖房需要削減に一役買っている可能性もあるため、都市省エネルギーの観点からはヒートアイランド現象改善策について夏期のみならず通年での評価をしなければならないと考える。

本稿では、ヒートアイランド緩和策として建物屋上に日射高反射熱高放射塗料を塗布する方策に着目した。首都圏の建物屋上に上記塗料を塗装したと仮定した場合の気温低減効果を、首都圏を対象とした3次元ヒートアイランドシミュレーションモデルにより夏期、冬期のそれぞれについて評価した。また住宅およびオフィス用動的熱負荷モデル^[6]により、同塗料を塗布したと仮定した場合の冷暖房負荷に与える影響についての通年評価を行った。モデルに入力する物性値のうち、塗料の反射率、放射率は測定実験により求め、また地表面の利用区別反射率、放射率については衛星データを用いた分析により決定した。

2、3次元熱環境シミュレーションモデル

2.1 熱環境シミュレーションモデルの構成

構築したモデルは都市部を中心とした局地的な気象現象をシミュレートするものであり、

風速場及び大気中の熱・水蒸気の3次元

移流拡散サブモデル

地表面及び海表面での熱収支サブモデル

地中及び海中での熱伝達サブモデル

の3つのサブモデルから構成される。

2.2 3次元移流拡散モデル

i) 基礎方程式

3次元熱移流拡散モデルは以下の式(1)~(6)の基礎方程式から構成される。

<質量保存式>

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

<運動方程式>

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{Hm} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{Hm} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Vm} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + f_x \quad (2) \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{Hm} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{Hm} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Vm} \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z}$$

$$\begin{aligned} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{Hm} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{Hm} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Vm} \frac{\partial v}{\partial z} \right) - f_y \quad (3) \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{Hm} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{Hm} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Vm} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial wu}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial y} + \frac{\partial ww}{\partial z}$$

$$\begin{aligned} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{Hm} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{Hm} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Vm} \frac{\partial w}{\partial z} \right) - g \frac{\theta}{\Theta} \quad (4) \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{Hm} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{Hm} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Vm} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

<エネルギー方程式>

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial \theta u}{\partial x} + \frac{\partial \theta v}{\partial y} + \frac{\partial \theta w}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{Hh} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{Hh} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Vh} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{Q_A}{c_p \rho} \quad (5) \end{aligned}$$

<水蒸気輸送方程式>

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial qu}{\partial x} + \frac{\partial qv}{\partial y} + \frac{\partial qw}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{Hh} \frac{\partial q}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{Hh} \frac{\partial q}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Vh} \frac{\partial q}{\partial z} \right) \quad (6) \end{aligned}$$

2.4 地中・海中熱伝導サブモデル

土壌内での熱拡散は鉛直方向の熱伝導が卓越しているため、本モデルでは地中内熱伝導については鉛直方向のみを考慮した。海中においては海流による熱拡散が存在するが、計算コストの関係から海中においても地中と同じモデルを用いた。

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z_s} \left(\frac{k_s}{\rho_s C_s} \frac{\partial T_s}{\partial z_s} \right) \quad (24)$$

S: 土壌密度 CS: 土壌熱容量
kS: 熱伝導率

3、首都圏を対象とした熱環境シミュレーション

上記モデルにより、首都圏を想定した熱環境シミュレーションを行った。

3.1 計算対象領域

本稿では図-2 に示す、東京を中心とした東西 80km、南北 60km、鉛直方向 2km の領域（メッシュ数 40×30×10）を想定計算対象領域としてシミュレーションを行った。

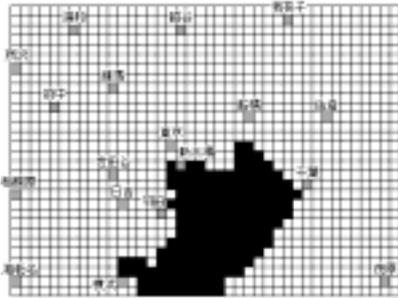


図-2 計算対象領域（水平方向）

3.2 計算条件

i) 初期条件

夏期および冬期について評価を行なうにあたり、夏期としては 8 月上旬、冬期としては 1 月上旬を想定した。両期とも、ヒートアイランド現象が顕在化しやすい条件（風が弱く、日中、夜間ともに晴天）が成り立っているとした。

表 - 1 初期条件

	夏期(8月上旬を想定)	冬期(1月上旬を想定)
x方向風速	0.0[m/s]	0.0[m/s]
y方向風速	0.0[m/s]	0.0[m/s]
z方向風速	0.0[m/s]	0.0[m/s]
大気温度	27.5[]	6.5[]
土壌表面温度	27.5[]	6.5[]
海中表面温度	27.5[]	6.5[]
水蒸気量	0.0173[kg/m3]	0.0173[kg/m3]
大気圧力	1013.25[Pa]	1013.25[Pa]
参照緯度	35.0[°]	35.0[°]
参照経度	139.0[°]	139.0[°]

ii) 地表面物性値

メッシュごとの地表面物性値は、土地利用区別に表 1 のように設定した値を現実の首都圏の土地利用割

合データに従って式(25)のように加重平均することで決定した。

$$C_{ij} R_{jk} = C M_{ik} \quad (25)$$

C_{ij}: 土地利用区分ごとの地表面物性値
R_{jk}: メッシュごとの土地利用割合
C M_{ik}: メッシュごとの地表面物性値

表-2 土地利用区分ごとの地表面物性値

	土壌熱伝導率	地表面熱伝導率	蒸発効率	粗度長
	[W/m・K]	[kJ/m2・K]	[J/m2・K]	[m]
田	1.0878	1940	83680	0.10
畑	1.0878	1940	83680	0.05
果樹園	1.0878	1940	83680	0.05
果樹園 2	1.0878	1940	83680	0.05
緑地	1.0878	1940	209200	0.10
裸地	1.0878	1940	83680	0.05
建物	21757	1940	418400	0.02
幹線	21757	1940	418400	0.00
その他	1.0878	1940	418400	0.02
内水地	1.0878	4184	41840	0.50
海浜	1.0878	4184	41840	0.50

なお本研究で特に注目する反射率、放射率については、特に大気温に与える影響が大きいことから以下のように、より詳細な検討を行なったうえで決定した。

<土地利用区分ごとの反射率・放射率値の決定>

ASTER によるデータ（人工衛星 TERR に搭載された地球観測センサーによるデータ。東京大学工学系研究科六川研究室より提供頂いた。解像度：可視域 15m、熱赤域 90m、以下「衛星データ」と呼ぶ。）及びデジタル地図ソフト（「でんぱつ地図ソフト」）を用いて分析を行い、土地利用区分ごとの反射率、放射率値を決定した。今回は東京都文京区付近の 2.7 km 四方（90m 四方メッシュ 30×30 個）の地域を対象として分析を行った。

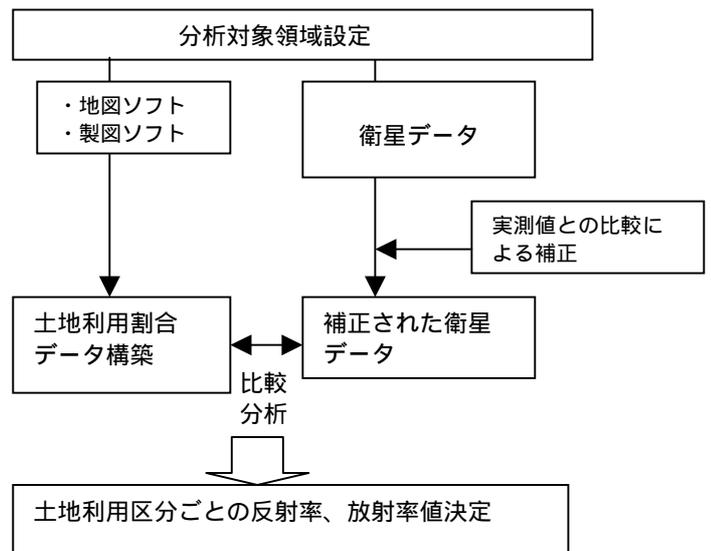


図-3：土地利用区別反射率、放射率値決定フロー

反射率値の決定

まず衛星データ反射率（90m四方単位）の絶対値の補正を行った。「補正のための測定地点」を決め、地表面反射率を長短波放射計にて実測し、同一地点の衛星データ値と比較した。補正のための地点としては少なくとも90m四方にわたって一様な場所である必要がある。今回は測定地点を 東京大学御殿下運動場とした。

計測機器 長短波放射計

計測日時 2001年11月

計測条件 昼夜ともに晴天の日について終日測定
反射率実測値は0.29であった。

表-3 反射率値比較

	反射率値
実測データ	0.29
衛星データ	0.34

衛星データの方が0.05大きく出ているため、衛星データ反射率値から一律に0.05減ずることで補正を行なった。

デジタル地図ソフトおよび製図ソフト AutoCADmap2000iを用い、衛星データと等しくなるように地図に90m四方のメッシュを30×30個かけ、メッシュ内の「建物」面積、「河川」面積、「緑地」面積、「裸地」面積、「道路、その他」面積を書き出し、領域内のメッシュごと土地利用割合データを構築した。

図4 - メッシュをかけたデジタル地図

緑地率が100%であるメッシュの衛星データ値を平均し、その値を「緑地」区分の反射率値とした。「河川」については河川が100%を占めるメッシュがないため、上記緑地の反射率値を所与として、以下のようにして決定した。

$$ReR = \{ ReM - (RaG \times ReG) \} / RaR \quad (26)$$

ReR：河川反射率
ReM：メッシュ反射率
RaG：メッシュ内緑地割合
ReG：緑地反射率
RaR：河川割合

同様に順次、「建物」「裸地」「道路その他」の反射率値を決定していった。決定した結果は以下のとおりである。

表-4：土地利用区分別反射率値

	建物	道路 その他	河川	緑地	裸地
反射率	0.39	0.32	0.10	0.33	0.28

放射率値

反射率の場合と同様、東京大学御殿下運動場の放射率値を実測し、衛星データの補正を行った。実測に際しての測定条件は反射率の場合と同様である。

表-5 放射率値比較

	放射率値
実測データ	0.97
衛星データ	0.93

衛星データの方が0.04低く出ているため、衛星データに一律0.04を加えることで補正を行った。反射率の場合と同様にして土地利用区分ごとの放射率値を決定した。結果は表-6のとおりである。

表-6 土地利用区分ごと放射率値

	建物	道路 その他	河川	緑地	裸地
放射率	0.96	0.91	0.93	0.95	0.92

iii) 人工廃熱

メッシュ毎廃熱データを、家庭、業務、産業、運輸の4部門について、それぞれ部門毎時間負荷曲線を作成し、モデルに組み込んだ。メッシュ毎廃熱データは夏期のものであるため、世帯別月毎熱電力負荷割合より1月、8月の廃熱量を推計したうえで比較し、家庭部門においては一律に夏期の2.59倍、業務部門においては同様に1.76倍したものが冬期の廃熱量であるとし、冬期のシミュレーションの際に用いた。産業、運輸の両部門は夏期、冬期とも廃熱量に違いはないとした。

3.3 実測データとの比較

以上のように設定した条件のもとで熱環境シミュレーションを行った。1月と8月の大気温度変化について、シミュレーション結果と気象庁の実測データ（気象庁年報）のうち1月および8月の快晴日平均値とを比較したところ図-5、6のようになった。

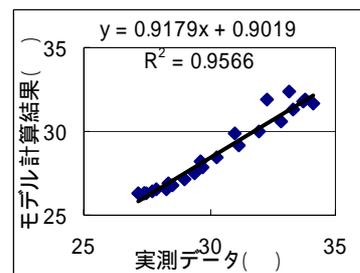


図-5：実測値との比較（夏期）

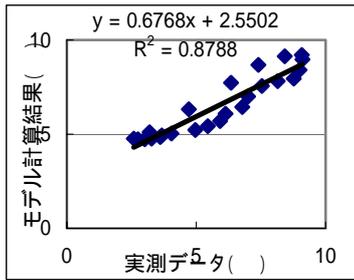


図-6：実測値との比較（冬期）

計算値の方が全体的に気温が高くでているが、おおむね良好な相関関係にあると言える。

4、ヒートアイランド緩和策の評価

ヒートアイランド現象への対策としてはいろいろなものが考えられているが、特に建物の日射高反射化策は建物蓄熱量の削減とそれに伴う冷房負荷の削減をもたらすヒートアイランド緩和に効果的である^{[4][5]}ことから、本稿では日射高反射熱高放射塗料を建物屋上に塗布する策を取り上げ、ヒートアイランド緩和効果について評価を行なった。

4.1 塗料の反射率・放射率測定実験

高反射高放射塗料塗布策を評価するには塗料の反射率、放射率を知る必要がある。本稿では市販されている高反射高放射塗料を板に塗布し、長短波放射計により実測することで反射率、放射率値を得た。

- ・ 計測機器：長短波放射計
- ・ 計測日時：平成13年5月～8月
- ・ 計測場所：東京大学（東京都文京区本郷）工学部4号館屋上
- ・ 計測対象：ベニヤ板に高反射高放射塗料を塗布したもの
屋上床面そのもの

計測結果は図-7のようになった。

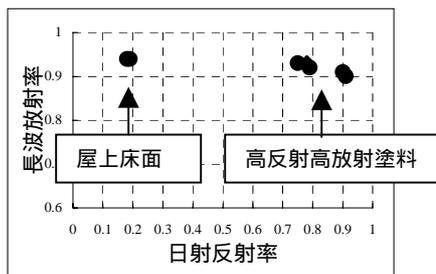


図-7：高反射高放射塗料および屋上床面の実測値

得られた測定値より、高反射高放射塗料の反射率、放射率としてヒートアイランドシミュレーションモデルには以下の値を入れることとした。

表-7：高反射高放射塗料モデル代入値

反射率値	0.85
放射率値	0.91

5、ヒートアイランドシミュレーション

以上の実験結果をふまえ、対象領域の全建物屋上に高反射高放射塗料を塗布したと仮定した場合のシミュ

レーションをおこなった。ヒートアイランド強度がもっとも強いと言われている東京都大手町付近の気温変化を見ると図-8、9のようになった。

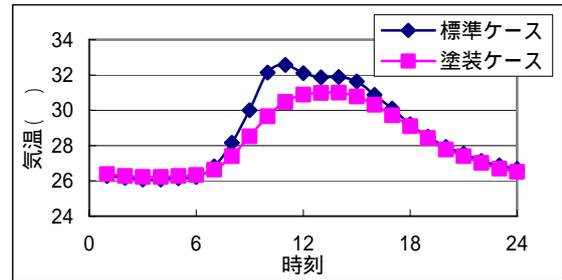


図-8：東京大手町付近の気温変化（夏期）

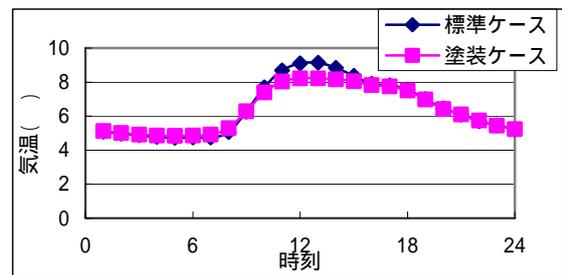


図-9：東京大手町付近の気温変化（冬期）

高反射高放射塗料を塗布することにより夏期冬期ともに日中の気温低減が見込まれることが定量的に示された。夏期で最大2.5、冬期では最大で0.9 気温が下がることにより、夏期には冷房負荷削減および電力ピークカット効果が見込まれる一方、逆に冬期には暖房負荷増大を招く可能性があることが示された。

6、住宅およびオフィス動的熱負荷シミュレーション

住宅及びオフィスの多数室熱負荷モデルを用い、高反射高放射塗料を屋根（屋上面）に塗装したと仮定した場合の年間冷暖房負荷に与える影響を評価する。

6.1 多数室熱負荷モデル

先に応答係数法を用いた単室熱負荷モデル^[6]を開発したが、個別空調建築物の熱負荷計算をおこなえるよう、文献[7]を参考に、このモデルを、差分法を用いて多数室の熱負荷が計算できるように変更した。以下の住宅及びオフィスの熱負荷計算においては、この多数室熱負荷モデルを用いる。

6.2 住宅多数室熱負荷モデル

住宅の建物概要は標準住宅問題^[8]に準拠して設計した。

- ・ 述べ床面積 120m²程度
 - ・ 階数 2階
- 夫婦＋子供2人の4人家族が住むことを想定している。

6.3 気象データ

気象データとして、拡張アメダス気象データ^[10]のうち、東京の標準年データを用いた。

6.4 冷暖房負荷計算

上記モデルにより、無対策ケース 屋根面のみ
に高反射高放射塗料を塗装したケース についてシミュレーションを行ったところ、年間での冷暖房負荷は図-9のようになった。冷房負荷が削減される一方で暖房負荷が増大してしまうため、通年で見た場合、塗料を塗布することにより0.3%増加してしまうことがわかった。

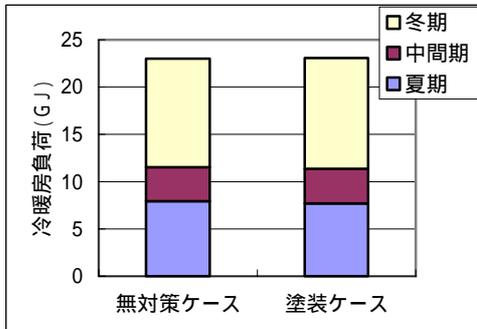


図 10：家庭部門冷暖房負荷

6.5 オフィス多数室熱負荷モデル

また、オフィス用標準問題^[9]に即してオフィスモデルを設計し、熱負荷計算を行った。

- ・所在地 東京都区内
- ・主用途 事務所
- ・階数 地下1階、地上8階、塔屋1階
- ・述べ床面積 7583.44m² (含 駐車場)
- ・構造 RC造

なお使用する気象データは住宅の場合と同様、拡張アメダス気象データのうち、東京の標準年データを用いた。

6.6 冷暖房負荷計算

上記モデルによって、住宅の場合と同様、無対策ケース 屋上面のみを高反射高放射塗料を塗布したケース についてシミュレーションを行ったところ、年間での冷暖房負荷は図-11のようになった。オフィスは内部発熱量が多いため冷房負荷削減量の方が暖房負荷の増大量より大きくなり、塗料を塗装すると通年でみて5%ほど削減されることがわかった。

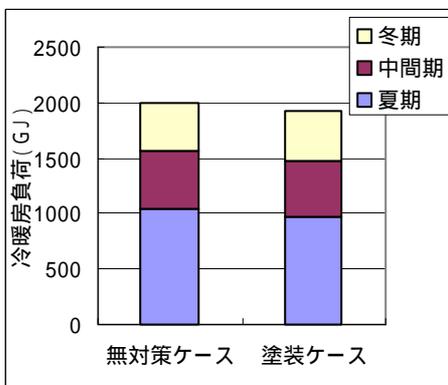


図-11：オフィスビルの年間冷暖房負荷量計算結果

7、おわりに

本稿では3次元ヒートアイランドシミュレーションモデルを用い、高反射高放射塗料塗布によるヒートアイランド緩和策についての評価を行った。ヒートアイランド現象は地表面状態に大きく依存するため、モデル構築の際には地表面物性値として設定する値を慎重に検討しなければならないが、本稿ではこの地表面物性値のうち特に大気温に大きく影響を与える反射率、放射率値について、高解像度の衛星データ、およびデジタル地図データを用いることにより詳細に検討した。

ヒートアイランド現象は特に夏期において問題視されることが多いが、都市省エネルギーの観点からは、冬期の暖房需要増の可能性にも注意を払う必要がある。本稿ではヒートアイランド緩和策として高反射高放射塗料塗布策を取り上げ、シミュレーションにより夏期冬期ともにヒートアイランド緩和がはかれることを定量的に示した。また住宅およびオフィス多数室熱負荷モデルを用いて、個別建物の冷暖房負荷に与える影響をみた。その結果、高反射高放射塗料はオフィスビルのような内部発熱量の多い建物に対しては冷暖房負荷削減がはかれることが示された。

8、参考文献

- [1] 中沢潔「高反射・高放射塗料によるヒートアイランド緩和策・省エネルギー方策に関する研究」東京大学大学院新領域創成科学研究科修士論文(2000)
- [2] 水島雅文、田村英寿、丸山康樹、角湯正剛「名古屋市とその周辺地域における熱環境シミュレーション」環境システム論文集 Vol. 22(1994)
- [3] s.v.Patanker 原著、水谷幸夫、香月正司共訳「コンピューターによる熱移動と流れの数値解析」森北出版(1985)
- [4] 古川道信「関東圏における熱環境シミュレーションモデルを用いたヒートアイランド現象の分析とその緩和策の研究」東京大学工学系研究科修士論文(1998)
- [5] 「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」環境省ヒートアイランド実態解析調査検討委員会報告(2001)
- [6] 井原智彦、石谷久、松橋隆治、吉田好邦、六川修一、近藤美則、樋口修二「オフィスビル実測値を用いた動的熱負荷モデルによるCO₂排出削減策の評価」エネルギー資源 Vol. 22-3(2001)
- [7] 石田健一、宇田川光弘「換気および壁面相互輻射を考慮した多数室室温・熱負荷計算法」日本建築学会計画系論文報告集 381.P46-55(1987)
- [8] 宇田川光弘「標準住宅問題の提案(住宅用標準問題)」日本建築学会環境工学委員会熱分科会第15回熱シンポジウム(1985)
- [9] 滝沢博「標準問題の提案(オフィス用標準問題)」日本建築学会環境工学委員会熱分科会第15回熱シンポジウム
- [10] 「拡張アメダス気象データ初版」日本建築学会編、丸善(2000)