

建物間における地表面熱収支の調査研究

増田, 正一

九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

片山, 忠久

九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

張, 晴原

九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

<https://doi.org/10.15017/17672>

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 8 (2), pp.237-242, 1987-01-26. 九州大学大学院総合理工学研究科

バージョン :

権利関係 :

建物間における地表面熱収支の調査研究

増田正一**・片山忠久*・張 晴原***

(昭和00年00月00日 受理)

Investigation on the Heat Balance of Ground Surface in an Urban Canyon

Shoichi MASUDA, Tadahisa KATAYAMA and Qingyuan ZHANG

In order to make clear the formation of thermal environment of an urban canyon, the solar radiation, upward and downward radiation, relative humidity, air temperature and underground temperature have been measured and heat balance of surfaces of pavement and lawn are analyzed quantitatively. As the results, underground heat flux of pavement is about 40% of net radiation, while convective heat flux to air is about 60% of net radiation. As for the lawn surface, the underground heat flux, convective heat flux to air and latent heat flux are 35%, 15% and 50% of net radiation, respectively.

1. 緒 言

建物にはさまれた外部の空間に形成される熱環境は、直接的には屋外活動の快適性を左右し¹⁾、マクロには都市気候を形成する単位となり²⁾、またミクロにはシェルターを通して室内気候に大きな影響を及ぼす。この建築外部空間の熱環境は、日射、風等の自然エネルギーの作用と建物の形態、配置、方位および地表面被覆材料等の設計計画上のパラメーターによって形成される³⁾。

しかし、このような熱環境の形成を対象とした建築外部空間の設計事例は少なく、またその設計のための基礎資料も、室内環境のそれに比べて非常に乏しいのが現状である。

設計パラメータの1つである地表面の被覆材料に関しては、その表面温度が熱環境に及ぼす影響は非常に大きいと考えられ⁴⁾、いくつかの実測例が既に報告されている⁵⁾。しかし地表面の熱収支に関する研究は、被覆材料の種類、表面の植栽の状態等、多くの条件を考慮すれば未だ充分とは云い難い⁶⁾⁷⁾。

本稿は、上記のような設計上の基礎資料を得ることを目的として、地被材料による表面熱収支の相違を実測結果に基づいて考察するものである。

記 号

- a : 熱拡散率, m^2/h
 C_b : 黒体の放射定数, $4.88 \text{ kcal}/\text{m}^2\text{K}^4$
 CO : 相関係数
 G : 地中伝熱量, $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$
 H : 対流熱伝達量, $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$
 L : 下向き長波長放射量, $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$
 IE : 蒸発潜熱量, $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$
 R_{net} : 放射収支量, $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$
 r : 日射反射率
 S : 水平面全天日射量, $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$
 T_o : 表面温度 ($=\theta_o+273$), K
 t_a : 気温, $^{\circ}\text{C}$
 t_g : グローブ温度, $^{\circ}\text{C}$
 v : 平均風速, m/s
 X_a : 地上1 mにおける絶対湿度, kg/kg'
 X_o : 芝表面温度の飽和絶対湿度, kg/kg'
 z : 深さあるいは高さ, m
 a_c : 対流熱伝達率, $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$
 a_r : 放射熱伝達率, $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$
 θ_o : 表面温度, $^{\circ}\text{C}$
 θ_z : 深さ z m における温度, $^{\circ}\text{C}$
 ϵ : 放射率
 λ : 熱伝導率, $\text{kcal}/\text{mh}^{\circ}\text{C}$
 ρc : 熱容量, $\text{kcal}/\text{m}^3^{\circ}\text{C}$

*熱エネルギーシステム工学専攻

**同上修士課程

***同上博士課程

2. 地表面温度と熱収支

地表面温度は多数の因子の関数であるが、それを求めるには地表面での熱収支を明らかにする必要がある。地表面における熱収支は一般に次のように表される⁸⁾。

$$R_{net} = G + H + IE \dots \dots \dots (1)$$

ここで、放射収支 R_{net} は下向きの日射および長波長放射と地表面温度に基づく上向きの放射の差として次式により計算される。

$$R_{net} = (1-r)S + \epsilon L - \epsilon C_b (T_0/100)^4 \dots \dots (2)$$

次に地中の熱伝導を1次元であると仮定し、それを表面における差分の形で示せば次のようになる。

$$\rho c \frac{\theta_0^{N+1} - \theta_0^N}{\Delta t} \Delta Z = G - \lambda \frac{\theta_{2Z}^N - \theta_0^N}{\Delta Z} \dots (3)$$

ただし、 N は時間、 Z は地中深さを示す。

本研究ではアスファルト面および芝地面における上向きと下向きの全放射量、水平面全天日射量、表面温度および地中温度を測定し、それぞれの地表面熱収支特性を明らかにする。アスファルト面においては $IE = 0$ と仮定し、式(3)によって G を計算する。地表面が芝に覆われているような場合、そこからの蒸発潜熱量 IE を直接求めることは非常に困難であり、 R_{net} 、 G および H の差としてこれを推定する。その際、対流熱伝達率 α_c として Jürges の式を使用し H を計算する。

$$\begin{aligned} \alpha_c &= 5.3 + 3.6v & (v \leq 5) \\ \alpha_c &= 6.47v^{0.78} & (v > 5) \end{aligned} \dots \dots \dots (4)$$

3. 実測方法の概要

東西を5階建、北側を1階の建物で囲われた中庭に、Fig. 1 に示す2つの測定点を設け実測を行う。測定点①はアスファルト面、測定点②は芝地面である。

下向きおよび上向き全放射量は、それぞれ下側および上側アダプター付き通風式風防型全波長放射収支計により、水平面全天日射量は簡易日射計により測定する。

気温は日射等の影響を除くため、直径 0.05 mmφ、裸線部長さ 5 cm の C-C 熱電対により測定する⁹⁾。地表

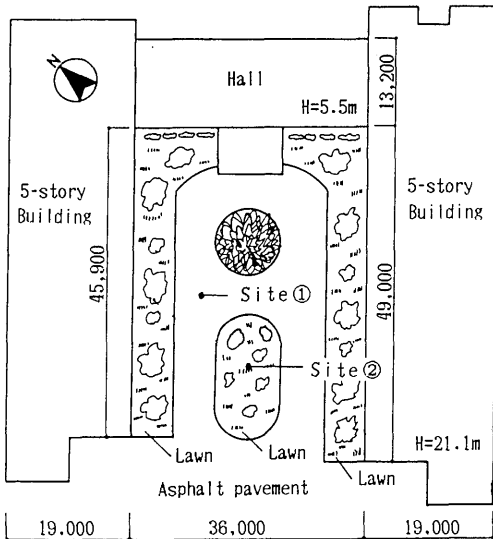


Fig. 1 Schematic depiction of dimensions and measuring sites

Table 1 Location and instrumentation of measurement

Item	Method	Height
Solar radiation	Pyrheliometer	Ground level
Air temperature	C-C Thermo-couple (0.05mmφ)	100cm
Globe temperature	C-C Thermo-couple (0.1mmφ) in black globe with a diameter of 15cm	100cm
Relative humidity	High-polymer Hygrometer	100cm
Wind speed	Super-sonic Anemometer	100cm
Soil temperature	C-C Thermo-couple (0.1mmφ)	Ground surface
	C-C Thermo-couple (0.3mmφ)	2,5cm under ground
Net radiation* (Upward, Downward)	Pyrradiometer	20cm

* at the pavement only

面温度とグローブ温度の測定には 0.1 mmφ の、地中温度の測定には 0.3 mmφ の C-C 熱電対を使用する。また、放射温度計を使用して壁面や樹木の葉面温度の測定も行っている。

相対湿度の測定は、高分子素子使用電気抵抗型湿度計をアスマン通風湿度計の中に設置し通風の状態で行う。

各測定点の地上高さ 100 cm における風速は 2 次元超音波風速計によって測定する。以上を Table 1 に示す。

データのサンプリング間隔は、風速については 5 秒であり、その他の項目については 5 分である。

4. 実測結果

4.1 実測結果の概要

実測は 1985 年 8 月 19~22 日の 4 日間に行っている。結果の記述は晴日の 19, 20 日の 2 日間に限定する。測定点①, ②に共通の日当りの時間帯は 9:00~16:20 である。

放射収支, 気温, 表面温度, 地中温度等は, 地表面の熱収支を考える場合重要な要素となる。

Fig. 2 に測定点①のアスファルト面における放射の実測値を示す。下向きの全放射量は、水平面全天日射量に約 400 kcal/m²h の大気放射, 壁面からの長波放射が加わったものになっている。上向きの全放射量は、日中の最大値で 650 kcal/m²h になり、夜間は表面温度の下降と共に約 400 kcal/m²h 程度まで減少する。

Fig. 3 にアスファルトと芝地の表面および地中温度を比較して示す。アスファルト面における表面温度は、気温より最大で 25°C 高く、60°C 程度にまで上昇しているのに対して、深さ 5 cm での地中温度は、50°C 程度までの上昇にとどまっている。一方、芝地面における表面温度はほとんど 40°C 以下であり、深さ 5 cm では

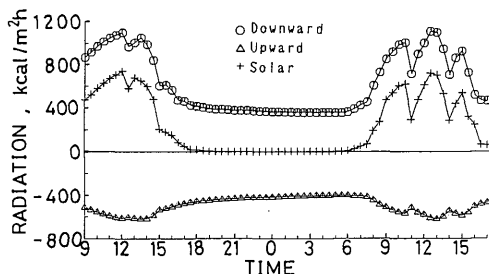


Fig. 2 Downward, upward and solar radiation measured at the pavement (Site ①) in the sunshine

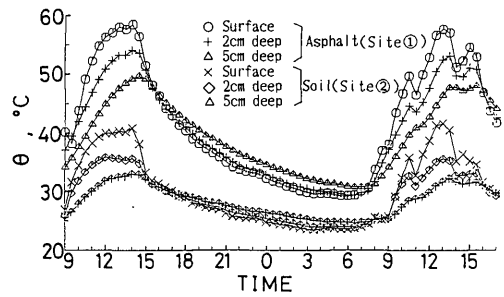


Fig. 3 Surface temperatures and underground temperatures

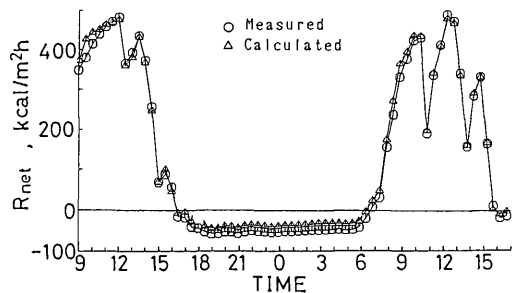


Fig. 4 Net radiations (R_{net}) at the pavement (Site ①)

33°C 以下になっている。

4.2 放射収支量

地表面における放射収支量を式(2)により計算する。ここでは、下向き全放射量, 水平面全天日射量および表面温度の実測値を用い、日射反射率 r および放射率 ϵ を仮定して行う。アスファルトに対しては、 $r=0.1$, $\epsilon=0.95$ とし、芝地面に対しては、 $r=0.3$, $\epsilon=1.0$ とする¹⁰⁾。

アスファルト面における下向きおよび上向き全放射量の差として求まる放射収支 R_{net} の実測値と式(2)による計算値を比較して Fig. 4 に示す。両者は良く一致しているので芝地面における放射収支 R_{net} として式(2)による計算値を用いる。

Fig. 5(a) および (b) はそれぞれアスファルト面と芝地面の、式(2)右辺各項で示される成分別放射吸収熱量を示す。日中アスファルト面の日射吸収量は芝地面に比較して最大約 200 kcal/m²h 大きく、上向き長波長放射量も最大 100 kcal/m²h 程度大きい。長波長放射の吸収量は両面において殆ど等しい。

Fig. 6 に各面の放射収支 R_{net} を比較して示す。主に日射吸収量の差と上向き長波長放射量の差から、日中はアスファルト面の R_{net} が約 100 kcal/m²h 芝地面

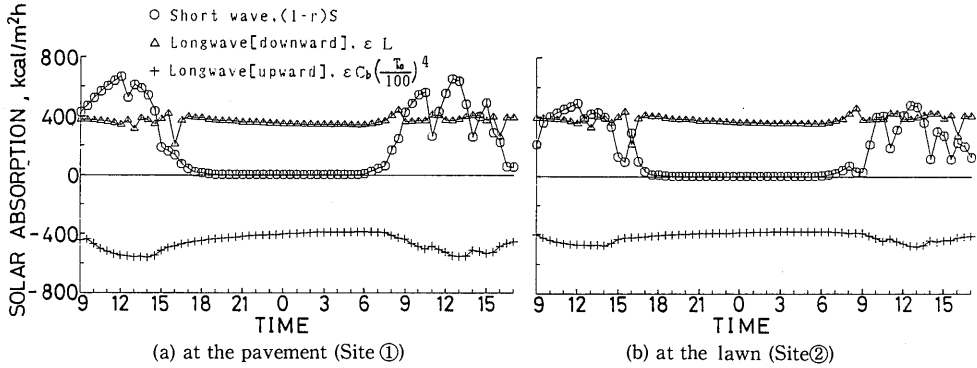


Fig. 5 Component solar absorption

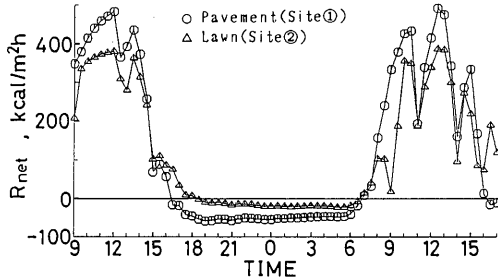


Fig. 6 Net radiations (R_{net})

より大きく、夜間は逆向きで最大 50 kcal/m²h 程度大きくなる。

4.3 地中伝熱量

アスファルト面或いは芝地面における地中伝熱量を求めるためには、各種材料の熱物性値を知る必要があり、それに関してはいくつかの提案がなされている。しかし、各面の熱物性値、特に土のそれは非常に多種多様であり、しかも含水率によって著しく影響される¹¹⁾。アスファルトおよび土の熱物性の代表値と変動幅は Table 2 の如くである¹⁰⁾¹²⁾。

Table 2 の値を用いて地中への伝熱量を式 (3) により計算する。

Fig. 7(a) および (b) はアスファルト面と芝地面の地中伝熱量を式 (3) および Fig. 3 から計算して比較したものである。熱物性の代表値を用いた計算結果で見ると、日中のアスファルト面における伝熱量は下向きで約 200 kcal/m²h であり、芝地においては約 120 kcal/m²h でアスファルト面の約 60% となっている。

4.4 対流熱伝達量および蒸発潜熱量

Fig. 8 にアスファルト面と芝地面の ($R_{net} - G$) を比較して示す。実測中のアスファルト面は乾燥しており、そこからの蒸発は無視出来るので、($R_{net} - G$) は対

流熱伝達量 H となる。地表面温度が上昇する日中この H の値は大きく、200~300 kcal/m²h となる。対流熱伝達量 H と {(アスファルト表面温度 θ_o) - (気温 t_a)} との関係を求めれば Fig. 9 に示すごとくであり両者の相関は比較的高い。また、対流熱伝達率 $H/(\theta_o - t_a)$ と地上 1 m の風速との関係を求めると、両者の相関はそれほど高くないけれども、Jürges の式とほぼ一致した結果が得られる。

一方、芝地面では日中も表面温度が余り上昇しないのでこの H の値はアスファルト面のそれに比べ小さい。風速の測定値および Jürges の式を使って対流熱伝達量 H を求めれば、日中の最大値は 60 kcal/m²h 程度である。

芝地面の ($R_{net} - G - H$) と {(芝表面温度の飽和絶対湿度 X_o) - (地上 1 m の絶対湿度 X_a)} の関係を求めれば Fig. 10 の如くである。芝地面の蒸発潜熱量 $IE (= R_{net} - G - H)$ と ($X_o - X_a$) の相関も比較的高い¹³⁾。

4.5 グローブ温度の推定

グローブ温度は熱環境を評価する上での重要な要素の 1 つである。日射量や気温が得られ、さらに熱収支に基づいて地表面温度が推定できれば、グローブ温度が計算によって求められ、そこでの熱環境をかなり正確に予測できることになる。その場合、気温と放射のデータを用いた実用的なグローブ温度の計算式として次式がある。

$$t_g - t_a = \epsilon J / (a_c + a_r) \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 J はグローブへの入射放射熱量である。また、 $\epsilon = 1.0$, $a_r = 4.4$ と仮定し、 a_c は球に対する対流熱伝達率の実験式による¹⁴⁾。

ここでは、地表面、建物壁面、樹木の葉面等の温度

Table 2 Values of thermal diffusivity

	Maximum	Minimum	Typical
Asphalt	$a = 0.0035$ ($\lambda = 0.7, \rho c = 200$)	$a = 0.0012$ ($\lambda = 0.6, \rho c = 500$)	$a = 0.0032$ ($\lambda = 0.68, \rho c = 211$)
Soil	$a = 0.0030$ ($\lambda = 1.0, \rho c = 300$)	$a = 0.0006$ ($\lambda = 0.3, \rho c = 500$)	$a = 0.0014$ ($\lambda = 0.53, \rho c = 379$)

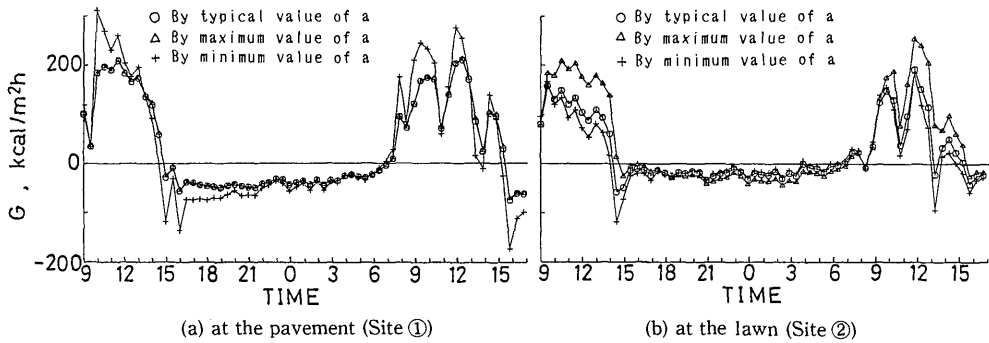


Fig. 7 Underground heat flux (G)

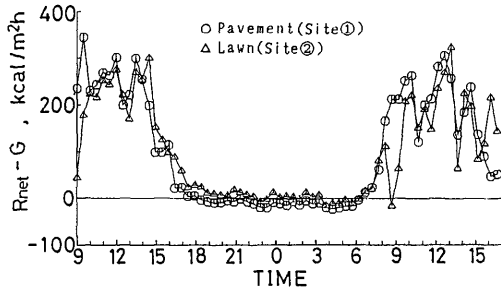


Fig. 8 ($R_{net} - G$) values at the pavement (Site ①) and the lawn (Site ②)

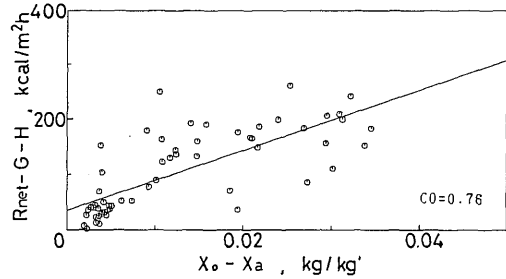


Fig. 10 Relation between ($X_0 - X_a$) and ($R_{net} - G - H$) values at the lawn (Site ②)

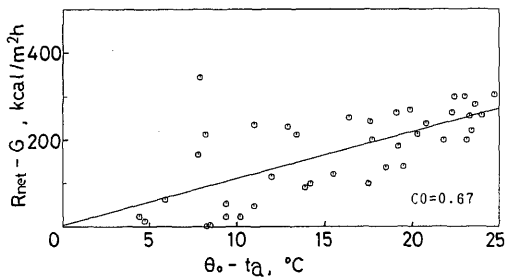


Fig. 9 Relation between ($\theta_0 - t_a$) and ($R_{net} - G$) values at the pavement (Site ①)

として実測値を使用し、各面への形態係数を考慮して J を計算し、式 (5) に代入する。

Fig. 11 にアスファルト面上および芝地面上 1 m における {(グローブ温度 t_g) - (気温 t_a)} の実測値と計算値を比較して示す。全体に計算値は実測値とよく一致しており、かなりよい精度でグローブ温度は計算により求められることがわかる。

5. 結果のまとめ

(1) 日中、アスファルト面の対流熱伝達量 H は大きく、 $H \propto (\theta_0 - t_a)$ である。芝地面では蒸発潜熱量 IE が大きく、 $IE \propto (X_0 - X_a)$ の関係がある。

(2) 日中の熱収支は、アスファルト面： $G/R_{net} = 0.40$, $H/R_{net} = 0.60$ である。一方、芝地面： $G/R_{net} =$

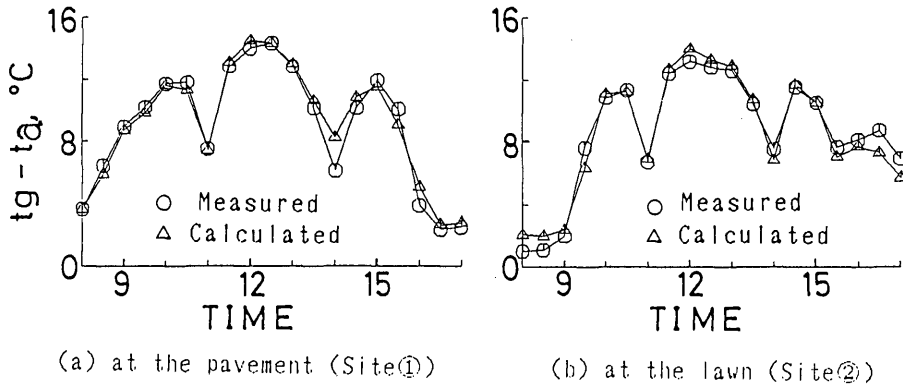


Fig. 11 Difference measured and calculated between globe temperature and air temperature

0.35, $H/R_{net}=0.15$, $IE/R_{net}=0.50$ である。

今回、建物間の狭い空間における地表面において実測により、その熱収支を明らかにした。しかし、この結果は、周辺の状況、地被材料の面積等の影響を受けるものと考えられる。今後さらに条件の異なる場所において実測を行い、検討する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 山口, 小林: “人体と建物, 地面および天空を含む外部環境の間の放射による熱交換”, 日本生気象学会雑誌, 第17巻1号 (1980).
- 2) 内藤, 水野, 漆崎: “都市気温形成因子としてのアーバンキャニオンの重要性”, 空気調和・衛生工学会論文集, No.22 (1983).
- 3) 尾島, 三浦: “建築外部空間構成の分類と熱環境のバイロット測定”, 日本建築学会論文報告集, 第335号 (1984).
- 4) 円満: “建物間の地表面における日射量と温度分布”, 空気調和・衛生工学会論文集, No.24, (1984).

- 5) 内藤, 水野, 山分: “局所熱環境に及ぼす周辺土地構成の影響”, 空気調和・衛生工学会論文集, No.25 (1984).
- 6) Nunez, M. and Oke, T. R.: The Energy Balance of an Urban Canyon, Journal of Applied Meteorology Vol.16 (1977).
- 7) 尾島, 森山: “地域環境アセスメントにおける地表面熱収支理論の応用研究”, 日本建築学会論文報告集, 第265号 (1978).
- 8) 近藤: “複雑多様な地表面の熱収支—研究の指針—”, 天気, 31, 9 (1980).
- 9) 中村, 平岡, 西村: “市街地空間における気温分布に関する研究”, 建築環境工学論文集 (1984).
- 10) 甲藤: 伝熱学特論, 養賢堂 (1981)
- 11) 中島, 大橋, 天野: “地中伝熱に関する研究”, 日本建築学会学術講演梗概集 (1980).
- 12) 成田, 関根, 三寺: “アスファルト舗装面における熱収支の実測”, 建築環境工学論文集 (1983).
- 13) 近藤: 大気境界層の科学, 東京堂出版 (1983)
- 14) 齊藤: 建築気候, 共立出版 (1974).