

## 23

札幌における降水涵養型ミズゴケ屋上緑化の  
熱収支に関する研究

会員 齊藤雅也（札幌市立高等専門学校） 山田雅仁（北海道大学低温科学研究所）  
坪谷太郎（北海道技術コンサルタント） 矢部和夫（札幌市立大学）  
佐直達夫（モステクノロジーズ） 那須 聖（札幌市立高等専門学校）

Study on Thermal Energy Balance of Rooftop Sphagnum  
with Recharged Rainwater System in Sapporo

Masaya SAITO<sup>1)</sup>, Masahito YAMADA<sup>2)</sup>,  
Taro TSUBOYA<sup>3)</sup>, Kazuo YABE<sup>4)</sup>, Tatsuo SAJIKI<sup>5)</sup>,  
and Satoshi NASU<sup>1)</sup>

1)Ph.D, Assistant Professor, Sapporo School of the Arts,  
Geijutsuno-mori 1 chome, Minami-ku, Sapporo 005-0864, JA-  
PAN, FAX:+81-11-592-5377, Email: msaito@sapporo-sa.ac.jp

2)Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University,  
3)Hokkaido Gijutsu Consultants Inc., 4)Sapporo City Univer-  
sity, 5)Moss Technologies

## ABSTRACT

This paper describes the results and discussion of the thermal energy balance of *rooftop sphagnum* with recharged rainwater system in Sapporo, Japan. Experimental field measurements between rooftop sphagnum and typical concrete roof were made from June to September in 2006. The surface temperature on the sphagnum is on an average 10 to 15 degree lower than in the case of concrete roof. According to both of thermal energy balances, in the case of sphagnum there is a lot of latent heat flux so that sensible heat flux and conductive heat into the concrete wall are significantly decreased in summer.

Keywords: Sphagnum, Rooftop greening, Thermal Energy Balance, Specific Latent Heat Flux, Biodiversity

## 1. はじめに

現在、屋上緑化は、ヒートアイランド化が顕著な首都圏などの都市部を中心に、その緩和策として全国的な拡がりを見せている。それらの熱的性能としては、多くの研究事例が見られ、屋上植栽からの蒸発散による表面温度の上昇抑制や顕熱の低減といった効果が定量的に示されている（例えば1）～3）。一方、全国の屋上緑化に採用されている植栽は、そのほとんどが薄層で頻繁な給水を要しないセダム種である。その理由は、屋上における荷重の軽減や維持管理の省力・省資源・省エネルギーを図るためとされている。しかしながら、全国の屋上緑化に限られた植栽だけが採用され、それが結果として支配的になるのは、植生の地域性や生物多様性に配慮した都市や建築の計画とは言い難い。もしそれらを踏まえるならば、地域

にある植生を活用した屋上緑化を開発する必要があると言える。

ミズゴケ群落は、かつて北海道・石狩平野で大規模に発達していたが、近年の札幌圏の都市化によってほぼ絶滅に近い状態になった。もともと群落を形成できた理由は、冷涼で多雪な気候特性を有しているからだが、札幌の気候自体は、今もかつてに比べて顕著な変化があるという報告はなく、ミズゴケのポテンシャルを活かした屋上緑化システムの有用性は期待できるといえる。たとえば、熱的性能だけでなく、都市域で失われた生物多様性を復元するとともに、延いては、都市洪水の緩和や大気汚染の浄化などに至るまでの都市環境を保全する役割を担う可能性があると考えられる。

筆者らは、屋上で簡単に採取できる降水（雨水・雪水）の有効活用にも着目し、降水だけで持続的に生育するミズゴケ群落を人工的に屋上に敷設し、ミズゴケの生育状況<sup>4)</sup>、熱的性能<sup>5)</sup>や有用性についての調査を2004年度より継続的に行なってきた。

本研究では、寒冷地・札幌における降水涵養型ミズゴケ屋上緑化システムの有用性について検討するための第一歩として、学校校舎屋上にミズゴケ区とコンクリート対象区を設けて熱環境実測を行ない、特にミズゴケ表面の熱収支メカニズムを明らかにした。本報ではその結果と考察を述べる。

## 2. 実測概要

2004年初夏、北海道石狩郡新篠津村（札幌市中心部から北東に25km）の学田湿原<sup>6)</sup>と、美唄湿原にあるミズゴケ群落からイボミズゴケ（以下、ミズゴケ）を採集し、実測地の札幌まで運搬、市販の黒色のプラスチックケース（外幅42.5 × 29.5 × 高さ21、内幅38 × 25.5 × 深さ20：単位は全てcm）にて栽培を始めた。泥炭を内底面から10cm程度深さまで入れ、その上にミズゴケを1ケースにつき30株を均等に配置した。ケース内底面から14cm高さに直径5mm穴を開け、満水になってもミズゴケが流れ出ないよう自動排水ができるようにした。

ミズゴケ土壌を含めたケース1個あたりの重量は、



Photo 1 A View of Experimental Measurement (Sapporo School of the Arts, Sapporo, Japan)

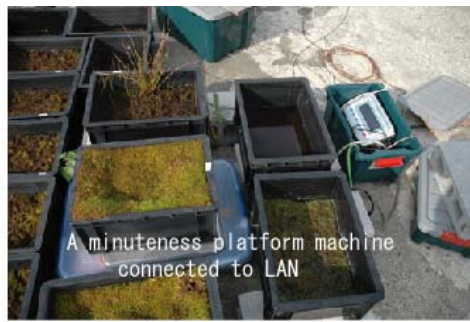


Photo 2 Gravimetric Measurement of Sphagnum Unit

含水率が比較的大きいときでも 18 ~ 20kg で、1 m<sup>2</sup>あたり約 180 ~ 200kg となる。これは建築基準法<sup>7)</sup>が定めている構造強度の事務室等の積載荷重限度 295kg/ m<sup>2</sup>以下なので、本屋上緑化システムは、設計用の積載荷重を上回らないと判断した。

熱環境実測は、札幌市立高等専門学校（札幌市南区芸術の森）の教育研究A棟（地上2階）の屋上部において、ミズゴケ区（以下、Sph区）とその比較対象区としてコンクリート区（以下、RC区）を設置し、2006年6月15日から9月15日にかけて行なった（Photo 1）。Fig. 1はA棟の屋上平面図である。中央部はガラス切妻屋根のアトリウムで、その部分を除く総面積は1125 m<sup>2</sup>である。地上高さは9.3mで、ガラス屋根の最高高さはA棟屋上表面から5.1mである。

Sph区は、前掲のミズゴケの入ったケース108個を配置した。その外周囲には、コンクリート屋根からの伝熱によるミズゴケへの影響をできる限り少なくするために水を満たしたケースを配置し、ミズゴケ区総面積は約 18.3 m<sup>2</sup> (=4.4 m × 4.15m) とした。なお、ミズゴケ自体の占有面積は、外周囲の水ケースと各ケースの縁部分を除き、約 10.5m<sup>2</sup> (=内幅 38cm × 25.5cm × 108個) となる。

Table 1に測定項目および測定機器の内容を示す。屋上部では、外気温湿度、風向・風速、全天日射量、降水量、気圧を30分間隔で測定し、Sph区とRC区ではそれぞれ、反射日射量、純放射量、屋上面高さ1mにおける空気温湿度を5分毎に計測した。Sph区では、ミズゴケ表面温度、ケース底面温度、ミズゴケ表面における熱流量、ケース下の既設屋上表面における熱流量を、RC区ではコンクリート屋根表面温度もそれぞれ5分毎に計測した。

またミズゴケの蒸発量を把握するために、Sph区東脇にてミズゴケが繁茂しているケース1個を精密電子台秤りに常時載せ、5分毎にその重量変化を自動計測した（Photo 2）。

### 3. 結果と考察

Fig. 2に2006年8月21日～9月2日における外気温、コンクリート表面温、ミズゴケ表面温、全天日射量の経時変化（下）を、ミズゴケ1ケースの重量

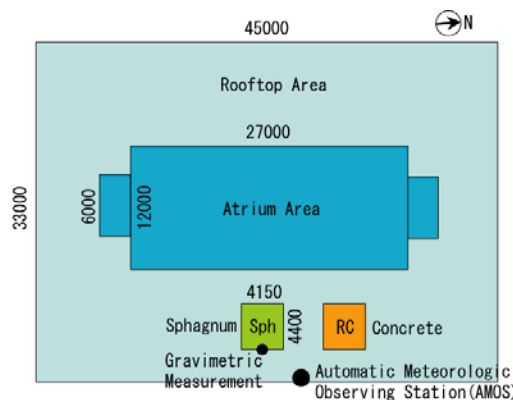


Figure 1 Rooftop Plan of "Building A" in SSTA

Table 1 Field Measurement Item

測定項目	測定装置(メーカー)
●屋外気象観測 (30分間隔)	
・全天日射量	日射計 (Prede社製 PCM-01)
・外気温湿度	気象観測装置 (DAVIS社製 Weather Station)
・風向風速	同上
・雨量	同上
・気圧	同上
●ミズゴケ区観測 (5分間隔)	
・反射日射量	日射計 (Prede社製 PCM-01)
・純放射量	放射収支計 (Prede社製 Q*7)
・高さ1m点空気温湿度	自記温湿度センサー (T&D社製 TR-72S)
・ミズゴケ表面温度	T型熱電対 (江藤電機社製 サーマミックローガー接続)
・ミズゴケ表面熱流	熱流板 (英弘精機社製 MF-180M)
・ケース底面温度	T型熱電対
・ケース底面熱流	熱流板 (英弘精機社製 MF-180M)
●コンクリート区観測 (5分間隔)	
・反射日射量	日射計 (Prede社製 PCM-01)
・純放射量	放射収支計 (Prede社製 Q*7)
・高さ1m点空気温湿度	自記温湿度センサー (T&D社製 TR-72S)
・コンクリート表面温度	T型熱電対 (江藤電機社製 サーマミックローガー接続)
・コンクリート表面熱流	熱流板 (英弘精機社製 MF-180M)
●重量変化計測 (5分間隔)	
・ミズゴケ重量	精密電子台秤 (A&D社製 GP-30KSR)

計測の経時変化と降水量（上）と併せて示した。

外気温が 29.5 にまで達する 8月26日は、コンクリート表面温が 50 に達するのに対して、ミズゴケ表面温は 35 に抑えられている。Fig. 3は8月15日～9月15日の外気温に対するSph区のミズゴケ表面温度とRC区のコンクリート表面温度の関係である。1ヶ月全体では、外気温 25 のとき、Sph区表面温はRC区表面温より 17.5、外気温 29 のとき 20.3 低いことがわかった。

Fig. 4に、全天日射量に対するSph区とRC区の反射日射量の間接関係、Fig. 5にRC区の純放射量に対するSph区の純放射量の間接関係をそれぞれ示す。全天日射量に対するSph区とRC区の反射日射量は、1次



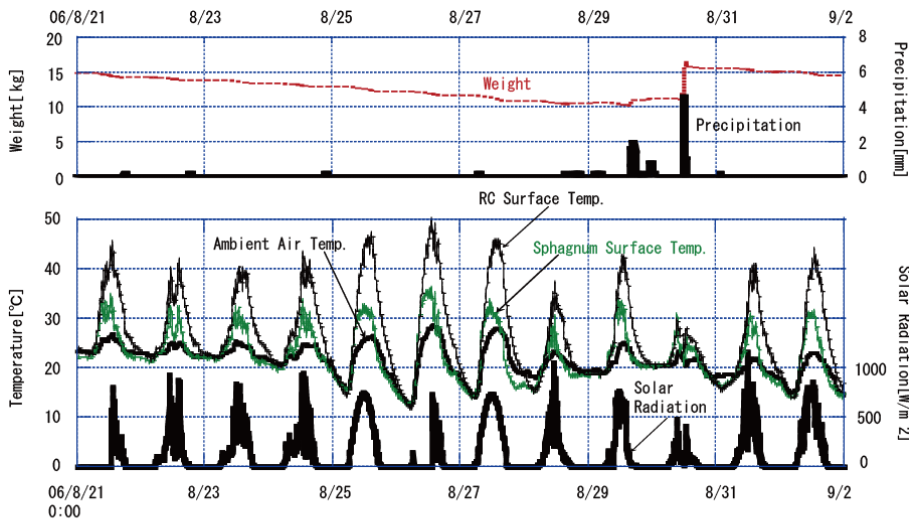


Figure 2 (Upper) Variation of Unit Weight and Precipitation (Lower) Temperatures Variation of Ambient Air, RC Surface, and Sphagnum Surface and Solar Radiation Variation

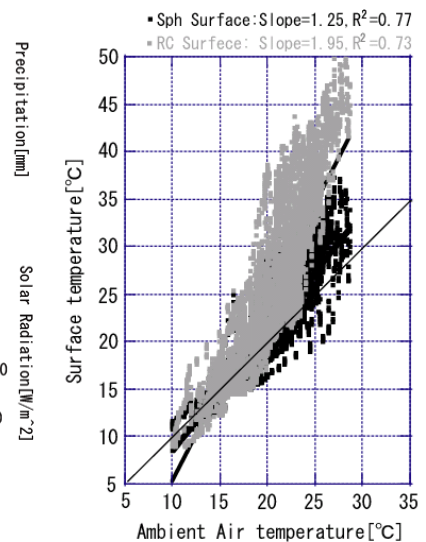


Figure 3 Sphagnum and RC Surface Temperatures

回帰式の傾きがRC区は0.26、Sph区は0.09となった。これは両区のアルベド（日射反射率）を意味する。一方、Fig.5に示した両区の放射収支量を比べると、夜間の両者には差がほとんどないが、外気温が上昇する昼間にSph区の放射収支の方がRC区より100～200W/m<sup>2</sup>（1.3倍）ほど大きくなる。

ところで両区の屋上表面から高さ1m点の気温は、外気温30のとき、RC区で32.5、Sph区31.2で、Sph区が1.3低い。この理由は、RC区の反射日射量がSph区より1.25倍大きいことと、ミズゴケからの水分蒸発のために潜熱が奪われたことでSph区の温度上昇が抑えられたからと考えられる。

以上を踏まえて、Sph区のミズゴケ表面とRC区のコンクリート表面での1次元熱収支による数値解析を行なった。ミズゴケ表面とコンクリート表面は非常に薄い層で熱が溜まらない定常状態を仮定した。Sph区とRC区の熱収支式は、次式(1)(2)のように書くことができる<sup>8)</sup>。

$$(1 - a_s) I + q_{ess} = h_{cs}(T_{ss} - T_o) + E + q_{cs} \quad (1)$$

$$(1 - a_R) I + q_{eSR} = h_{cR}(T_{sR} - T_o) + 0 + q_{cR} \quad (2)$$

a: 日射反射率（アルベド），I: 日射量， $q_{es}$ : 実効放射量， $h_c$ : 対流熱伝達率， $T_s$ : 表面温度， $T_o$ : 外気温

: 蒸発潜熱，E: 蒸発量， $q_c$ : 伝導熱流量。添字末尾のS: Sph区，R: RC区を意味する。各項の単位はすべてW/m<sup>2</sup>。

式(1)(2)の左辺第1項と第2項は、吸収日射量と実効放射量の和であり、Sph区とRC区それぞれの純放射量に相当する。右辺第1項は顕熱量、右辺第2項は潜熱量、右辺第3項はそれぞれの表面からの下向きを正とする伝導熱流量である。式(2)の右辺第2項は、晴天日が連続し、コンクリート表面は乾燥し、潜熱が無いものと仮定しゼロとした。

まずSph区の式(1)の各項を明らかにするために、左辺の純放射量と右辺第3項の伝導熱流量は実

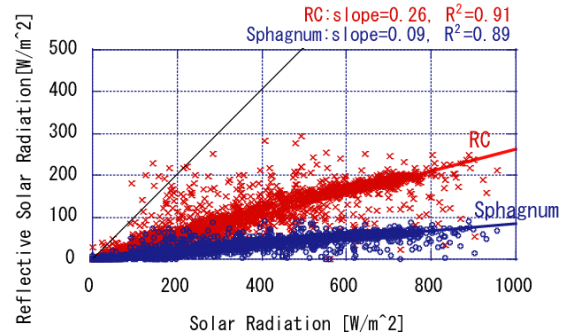


Figure 4 Solar Radiation and Reflective Solar Radiation

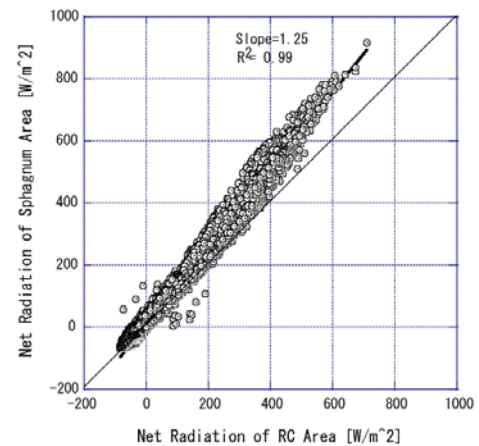


Figure 5 Net Radiations at the RC and Sphagnum Area

測値をそのまま代入した。右辺第2項の潜熱量は、重量計測の時間差分として得た蒸発量に蒸発潜熱を乗じ、単位面積あたりとして求めた。以上を晴天が連続した8月23日～27日について示したのがFig.6である。

なお、潜熱（図中の $Q_{lat}$ ）の値には、ばらつきが相当見られる。これは計算に用いた重量計測値（蒸発量）の経時変化が安定しなかったことが原因と考えられる。そこで別の方法で潜熱を推定することにした。まず、対流熱伝達率 $h_{cs}$ をJurgesの式<sup>9) 註1)</sup>から得た後、ミズゴケ表面温と外気温の差を $h_{cs}$ に乘じ

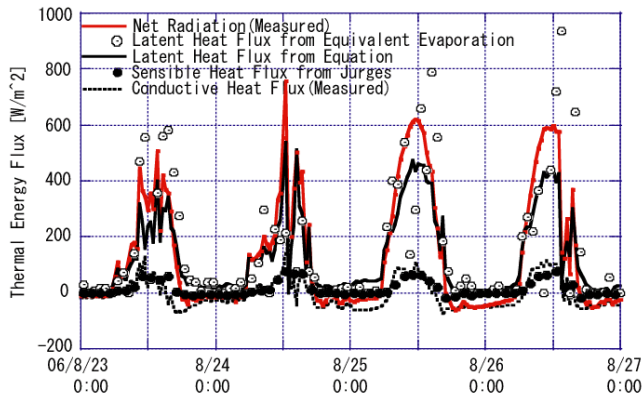


Fig.6 Variations of Thermal Energy Balance at the Sphagnum Surface

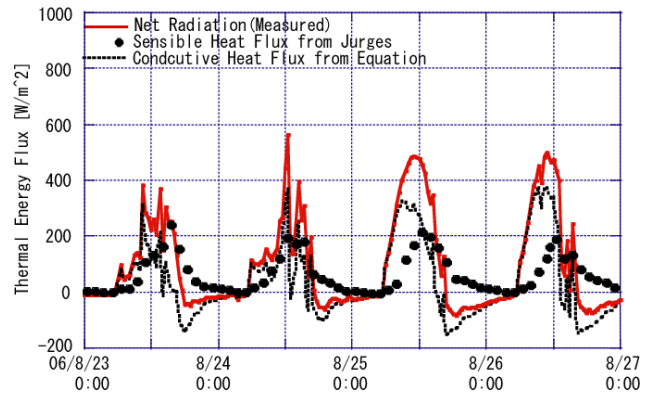


Fig.7 Variations of Thermal Energy Balance at the Concrete Surface

て Sph 区の顕熱とした。以上を式(1)に代入して得た潜熱量を Fig.6 に黒実線で示す。

RC 区ではコンクリート表面の熱流板の値が欠測だったので、伝導熱流量を未知数として算出した。右辺第1項の顕熱は、Sph 区と同様に Jürges 式を用いて計算した。RC 区の伝導熱流量は純放射量と顕熱の差として得た。その結果が Fig.7 である。

両区の熱収支を比べると、昼間の RC 区では、純放射量に対して顕熱、伝導熱流量ともに Sph 区より著しく大きい。RC 区の純放射 500W/m<sup>2</sup> に対して、それぞれピークを迎える時間に差は生ずるが、顕熱・伝導熱流量ともに 250 ~ 350W/m<sup>2</sup> 程度まで上昇する。一方、Sph 区では、純放射が 600W/m<sup>2</sup> を上回る場合でも、純放射の上昇とともに潜熱が 400W/m<sup>2</sup> 程度にまで達するので、顕熱、伝導熱流量の上昇は抑えられ、それらのピークはいずれも 100W/m<sup>2</sup> 未満である。

Fig.8 は、8 月 15 日 ~ 9 月 15 日における RC 区の顕熱に対する Sph 区の顕熱と潜熱(式(1)の残差)の散布図である。RC 区の顕熱に対して、Sph 区の顕熱は比較的小さい。それは潜熱があることによる。Sph 区ではミズゴケからの水分拡散に伴い、ミズゴケ表層近傍の空気から潜熱が奪われたことにより、顕熱、伝導熱流量が小さく抑えられたと考えられる。

ミズゴケ面は、大きな日射をコンクリート面より吸収するにも関わらず、その表面温が 20 もコンクリート面より低い理由は、ミズゴケが日射を資源として水蒸気拡散を円滑に行なったことによるものと確認できた。

#### 4. まとめ

- 1) 北海道にあるミズゴケを活用した降水灌養型屋上緑化システムを開発するとともに、熱環境のおおよその実態を把握することができた。
- 2) ミズゴケの日射反射率(0.09)は、コンクリート(0.26)より小さいが、外気温が 30 ではミズゴケ表面温はコンクリートより 20 低い。
- 3) 夏季の昼間、ミズゴケ面では 400W/m<sup>2</sup> 程度の潜熱によって、コンクリート面よりも顕熱と土壤熱流量を 100W/m<sup>2</sup> 程度に抑えることがわかった。

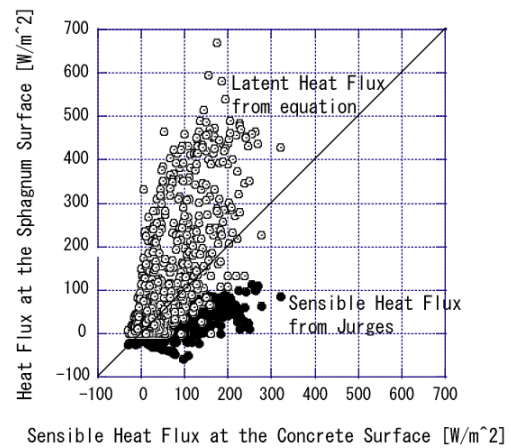


Fig.8 Sensible Heat Flux and Latent Heat Flux from the Concrete and Sphagnum Surfaces

註1) 対流熱伝達率  $h_{cs}$  と  $h_{cr}$  は、次の Jürges の式<sup>10)</sup> にしたがった。

$$h_{cs}=h_{cr}=5.8+3.9V \text{ (ただし、} V \text{: 外部風速、} V \le 5.0\text{m/s)}$$

(謝辞) 本研究を実施するにあたり、以下の皆様から多大なご協力とご支援をいただいたので謝意を表明する。高橋昌二さま(有限会社高橋ビートモス工業代表取締役)、高橋英紀先生(NPO 法人北海道水文気候研究所・元北海道大学)、若松茂さま(札幌市立大学総務課施設担当係長)、瀧木勲さま(札幌市立高等専門学校総務課技術職員)。なお、本研究は 2004 年度 ~ 2006 年度の 3 年間において「札幌市プロジェクト研究」の研究助成〔研究代表者: 矢部和夫(04-05)、斉藤雅也(06)〕を受けた。

参考文献

- 1) 三坂育正・石井康一郎・横山仁・山口隆子・成田健一: 軽量・薄層型屋上緑化技術のヒートアイランド緩和効果の定量評価に関する研究、日本建築学会技術報告集第 21 号、2005.6、pp.195-198。
- 2) 萩島理・谷本潤・高尾京子: 壁面緑化システムの熱収支構造に関する屋外観測、日本建築学会技術報告集第 22 号、2005.12、pp.253-258。
- 3) 吉永美香・比留間直也・野田宗弘・奥宮正哉: メキシコマンネンサと軽量人口土壌を用いた屋上緑化システムの蒸発散特性、日本建築学会技術報告集第 23 号、2006.6、pp.217-222。
- 4) 高野聡子・矢部和夫・佐直達夫・那須聖・斉藤雅也・山田雅仁・高橋英紀: 降水灌養型屋上緑化方法の開発研究、日本造園学会北海道支部大会、2005.9。
- 5) 山田雅仁・斉藤雅也・坪谷太郎・矢部和夫・那須聖・佐直達夫・高野聡子: 寒冷地におけるミズゴケを使った屋上緑化の熱収支と温度環境、農業環境工学関連学会 2006 年合同大会、2006.9。
- 6) 梅沢俊: 北海道 花の散歩道、北海タイムス社、pp.86-92、1982 (絶版本)。
- 7) 国土交通省住宅局建築指導課: 基本建築関係法令集(法令編)平成 18 年版、第 3 章 所収、霞ヶ関出版、2006、pp.262-263。
- 8) 斉藤雅也・高橋達・宿谷昌則: 葉のエクセルギー収支に関する数値解析 涼房手法としての樹木の効果に関する基礎的研究、日本建築学会計画系論文集 第 505 号、1998.3、pp.51-58。
- 9) 吉門洋・近藤裕昭・亀卦川幸浩: 東京都心部ビル屋上の気象観測に基づく熱環境の評価、日本気象学会機関誌「天気」49 巻 11 号、pp.887-899。
- 10) 田中俊六・武田仁・足立哲夫・土屋喬雄: 最新建築環境工学(改訂 2 版)、井上書院、2000.8、p.181。