

屋上ビオトープに関する研究

その1 アメニティ型屋上ビオトープの概要とビオトープの設置が室内に及ぼす熱的効果の検証



三浦 寿幸 *1

石田 晶久 *2 篠崎 徹 *1
 神野 兼次 *3 浦田 裕司 *4
 宮本 徹 *5 小山 大介 *2

概 要

東京都の条例改正を契機に屋上を緑化する建物が増えてきた。屋上緑化の一形態である屋上ビオトープは昆虫や小鳥などの生物の誘致・保全効果を期待するものだが、室内の熱環境改善やヒートアイランド現象の緩和などさまざまな波及効果があると考えられる。筆者らは、「人と自然のふれあい」をテーマとしたアメニティ型屋上ビオトープのモデル施設を戸田建設技術研究所敷地内の既存建物屋上に設置し、モニタリング調査を実施してきた。本報告は、アメニティ型屋上ビオトープの概要と、ビオトープの設置が室内に及ぼす熱的効果の検証結果について述べたものである。

A Study on Rooftop Biotopes

Part 1 An Outline of Amenity Type Rooftop Biotope and Measurement of its Thermal Effect on Indoor Environment

Toshiyuki MIURA *1
 Akihisa ISHIDA *2 Tooru SHINOZAKI *1
 Kenji JINNO *3 Yuuji URATA *4
 Tooru MIYAMOTO *5 Daisuke OYAMA *2

Rooftop green spaces and gardens have increased since the revision of regulations in Tokyo. The rooftop biotope is a form of rooftop gardens which can expect to contribute not only to the preservation of biodiversity but also to improving indoor thermal environment and heat island phenomena.

The authors proposed on amenity type rooftop biotope whose theme was a contact between humans and nature. Its model biotope was produced on an existing building rooftop of Technical Research Institute, Toda Corp., measurements and investigations were conducted.

In this report the outline of the amenity type rooftop biotope and measurement of its thermal effect on indoor environment are described.

*1 技術研究所 *2 計画設計部 *3 千葉支店建築部設備課 *4 東北支店建築部技術課 *5 エンジニアリング部
 *1 Technical Research Institute *2 Architectural Design Dept. *3 Chiba Branch
 *4 Tohoku Branch *5 Engineering Dept.

屋上ビオトープに関する研究

その1 アメニティ型屋上ビオトープの概要とビオトープの設置が室内に及ぼす熱的効の検証

三浦 寿幸*1 石田 晶久*2
 篠崎 徹*1 神野 兼次*3
 浦田 裕司*4 宮本 徹*5
 小山 大介*2

1. はじめに

建物の緑化は従来より行われてきているが、近年、都市環境問題の顕在化や東京都の条例改正などを契機に、その検討機会が増えてきた。屋上緑化の一形態である屋上ビオトープは、昆虫や小鳥などの生物の誘致・保全効果を期待するものだが、室内の熱環境改善やヒートアイランド現象の緩和などさまざまな波及効果があると考えられる。筆者らは、「人と自然のふれあい」をテーマとしたアメニティ型屋上ビオトープのモデル施設を戸田建設技術研究所敷地内の既存建物屋上に設置し、屋上ビオトープの種々の効果や維持管理に関する基礎データを蓄積するため、モニタリング調査を実施してきた。本報告では、アメニティ型屋上ビオトープの概要と、屋上ビオトープの設置が室内に及ぼす熱的効果の検証結果について述べる。

2. アメニティ型屋上ビオトープ

2.1 アメニティ型屋上ビオトープのコンセプト

屋上緑化に期待される効果は多岐にわたる。動植物の生息環境の向上もそのひとつであり、都市において生物の回廊が形成され、建物の屋上に昆虫や小鳥などの多様な生物が生息できる場が提供されるならば、自然生態系復元への貢献も期待できる。しかしながら、動植物のことだけを考えた屋上ということでは、提案として受け入れられる機会が一般に少ないと考えられ、管理上の問題も含めて建物ユーザーとの関係をどう位置付けるかが大切になる。

筆者らはこうした観点から、「人と自然のふれあい」をテーマとしたアメニティ型屋上ビオトープを提案し、そのモデル施設を戸田建設技術研究所（つくば市）敷地内の実験棟2階屋上に設置した。竣工時（2002年3月末）の状況を写真-1、屋上平面図を図-1に示す。ゆるやかな起伏と曲線をつけた歩道沿いに、水が湧き出るバードバス、小川、橋、池などを配置し、歩いて楽しい変化のある風景を演出した。多様な生物の生息環境へ配慮するとともに、「人と自然のふれあい」という観点から、都市生活者が「季節の移り変わりを”見る”」、「虫や鳥の声、水の流れを”聴く”」、「草花に”触れる”」、「花のおいを”嗅ぐ”」、「自然の恵みを”味わう」といった五感を通して安らぎや癒しが得られるような空間を意図した。



写真-1 屋上ビオトープ（竣工時）

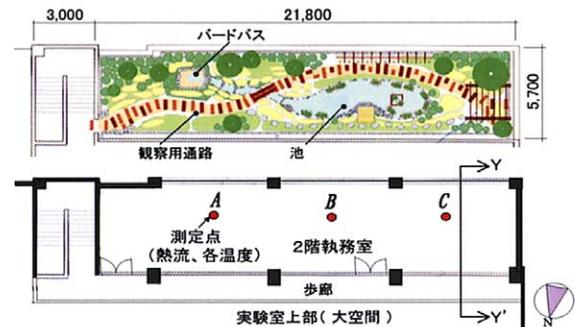


図-1 屋上ビオトープ平面図及び2階平面図・測定位置

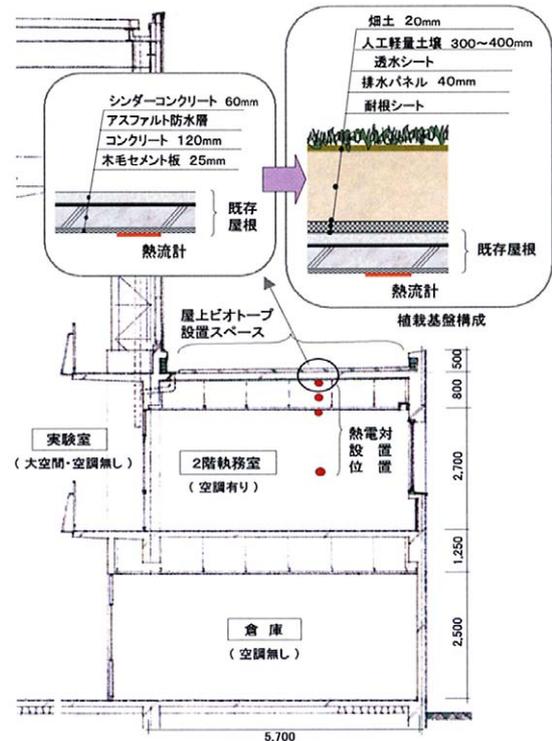


図-2 Y-Y' 断面図及び植栽基盤の構成

*1 技術研究所 *2 計画設計部 *3 千葉支店建築部設備課 *4 東北支店建築部技術課 *5 エンジニアリング部

2. 2 アメニティ型屋上ビオトープの概要

ビオトープ全体の設置面積は約105m²（短辺方向約5m、長辺方向約21m）、このうち池や小川などの水域面積は約15m²で、池の水深の最大は約300mmである。植栽は鳥や昆虫のために実がなるもの、花が咲くものを多く選定し、高木7種類、低木16種類、野菜やハーブのほか、田んぼのあぜ道に生育している地被類も植えた。植栽基盤は、図-2に示すように耐根シート、排水パネル(発泡ポリスチレン製40mm厚)、透水シート、人工軽量土壌、畑土で構成し、土壌厚は約300~400mmを確保している。屋根スラブにはビオトープ設置前より木毛セメント板25mm(熱伝導率0.21W/mK)が室内側に配置された状態である。また、歩道やバードバスの下部は嵩上げ材(発泡材)を設置して軽量化し、施設全体の平均積載荷重を約300kg/m²に抑えた。池の水はポンプで循環させており、地中埋設配管を通してバードバスに汲み上げた後、小川を経由して池へ戻している。そのポンプの動力は太陽電池と風力発電によって得られた電力でその大部分が賄われている。

灌水は染み出しパイプによる自動灌水方式で、一部のエリアには雨水を利用したシステムを採用している。植栽基盤への降雨は土壌の保水効果によりある程度利用されることになるが、水域に降り注ぐ雨の余剰分は何も工夫がなければオーバーフローとなって排出されてしまう。ここでは一部のエリアに雨水の貯留と毛細管現象による土壌への給水が可能なタンクを連結して埋設し、そこに降雨時のオーバーフロー水を自動的に導入する仕組みを考案し、採用している。

維持管理は雑草の除去、樹木の剪定を夏1回/月、冬1回/2ヶ月を目安として実施している。

3. 屋上ビオトープの設置が室内に及ぼす熱的効果の検証

植栽基盤の土厚をある程度確保していることから、この屋上ビオトープではセダム等の薄層緑化に比べて夏季

表-1 測定項目・センサー等

測定項目	センサー、計測機器	測定点数	備考
天井裏屋根スラブ下面熱流	熱流計 EIKO CN-9L	3	●サンプリング間隔1分とし、10分毎の平均値を記録
天井裏屋根スラブ下面温度	T型熱電対	3	
天井裏空気温度	"	3	
執務室 室温	"	3	●外気湿度のみサンプリング間隔10分
執務室 室内側天井表面温度	"	3	
実験室(大空間) 空気温度	"	1	
外気温度	"	1	} 別棟(3階建)屋上にて測定
外気温湿度	T型熱電対、おんどとり	各1	
水平面全天日射量	ネオ日射計	1	
降雨量	転倒ます式	1	

の蒸発散による大気冷却効果が期待できるだけでなく、屋根全体の熱抵抗や熱容量が相対的に大きくなるため、屋根スラブを通しての冬季の熱損失や夏季の流入熱を抑える効果が期待できる。以下では屋上ビオトープの設置前後に行なった実測結果に基づき、屋上ビオトープの設置が室内に及ぼす熱的効果について検討する。

3. 1 実測概要

実測はビオトープ設置前年の2001年6月より開始し、翌年2月の施工を経て、その後も継続した。表-1に測定項目及び使用センサー・機器を示す。2階室内の3ヶ所(図-1、2参照、測定点Aはバードバス近辺植栽下、Bは通路と池の間の植栽下、Cは通路近辺植栽下)で、天井裏の木毛セメント板表面(以後、屋根スラブ下面と呼ぶ)温度・熱流、天井裏空気温度、執務室空気温度、執務室天井表面温度、屋上で外気温度を実測した。また、同じ敷地内の建物(3階建)屋上で、外気温湿度、水平面全天日射量、降雨量を測定した。なお、2階の執務室は空調運転されており、隣室や下階は非空調室となっている。

3. 2 夏冬代表日におけるビオトープ設置前後の比較

夏季代表日における温度及び熱流の経時変化を屋上ビオトープ設置前後で比較して図-3に示す。3ヶ所で測定

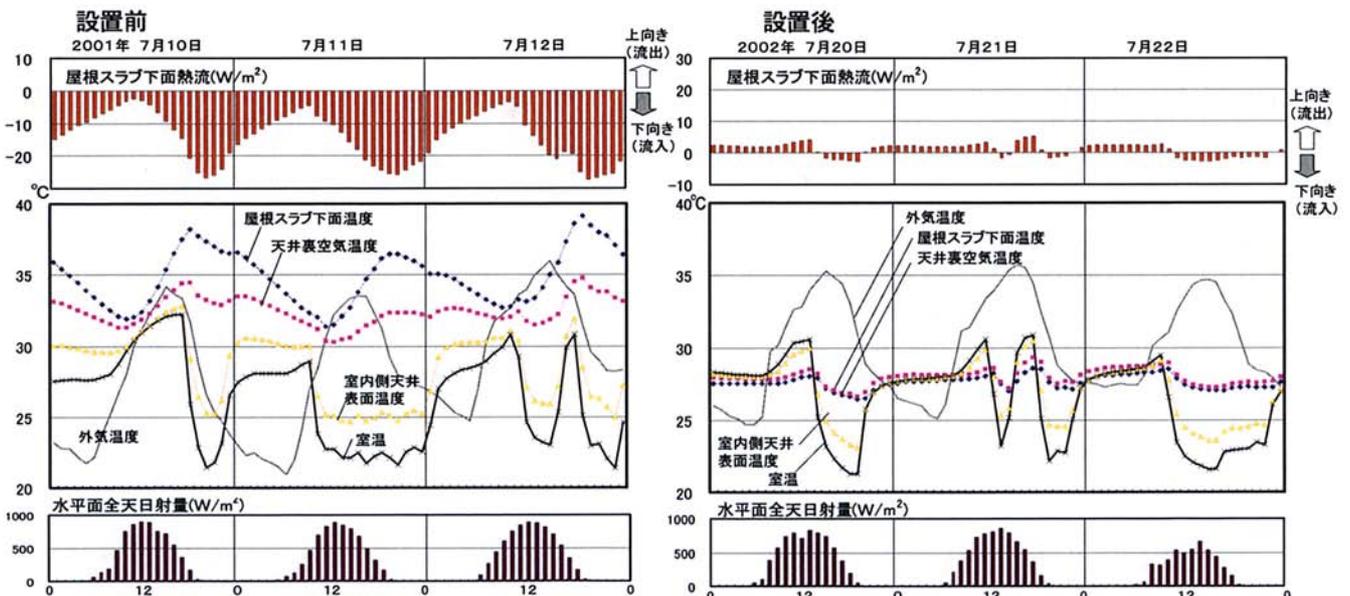


図-3 夏季における屋上ビオトープ設置前後の温度、熱流の比較

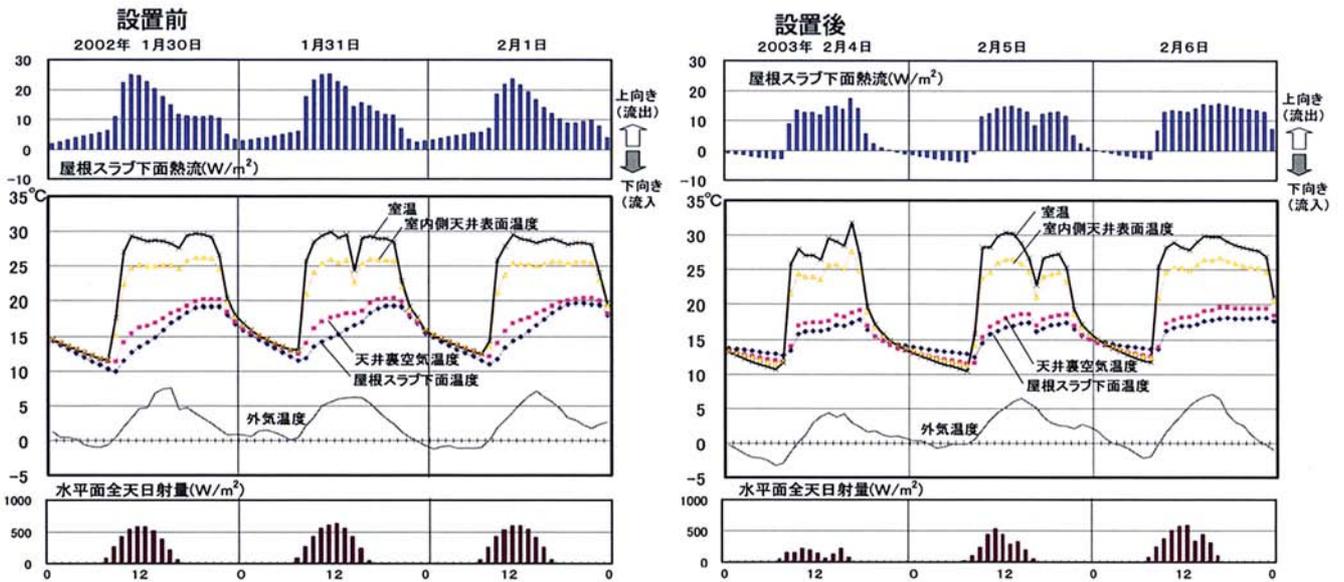


図-4 冬季における屋上ピオトープ設置前後の温度、熱流の比較

した各温度、熱流は測定点による差が小さかったため、平均値で整理した。設置前は日射の影響で屋根スラブ下面温度がほとんどの時間帯で外気温度よりも高く推移しており、天井裏の気温を引き上げている。屋根スラブ下面熱流のピークは20~21時頃にあらわれ、25W/m²前後である。これに対し、設置後の屋根スラブ下面及び天井裏気温は安定しており、熱流の変化や絶対量も小さい。つまり、屋上ピオトープの設置によって屋根を通しての外乱による熱的影響が大幅に緩和されたといえる。

図-4に冬季の設置前後を比較して示す。冬季（暖房時）は夏季（冷房時）と屋根スラブ下面熱流の向きが逆

になり、室内側から天井材や天井裏気温及び屋根スラブ下面を暖める形になる。これより設置後の熱損失低減効果は認められるが、熱流に夏季ほど極端な差はない。その理由のひとつに、植栽基盤の熱抵抗が内外温度差起因の熱損失低減には有効であるものの、冬季

表-2 分析に用いた実測データ

屋上ピオトープ	季節	期間	平均外気温度	平均日積算日射量
設置前	夏	2001年7月~2001年9月	24.6℃	15.5MJ/m ²
	冬	2001年12月~2002年2月上旬	4.7℃	9.7MJ/m ²
設置後	夏	2002年7月~2002年9月	24.9℃	15.5MJ/m ²
	冬	2002年12月~2003年2月中旬	3.7℃	9.3MJ/m ²

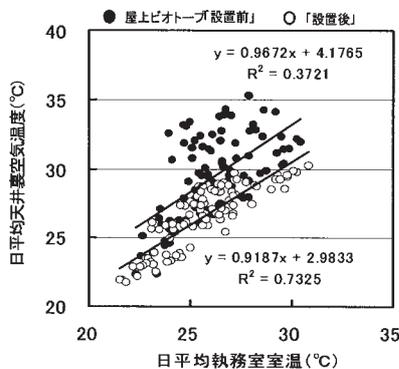


図-5 執務室室温と天井裏空気温度との関係（夏季）

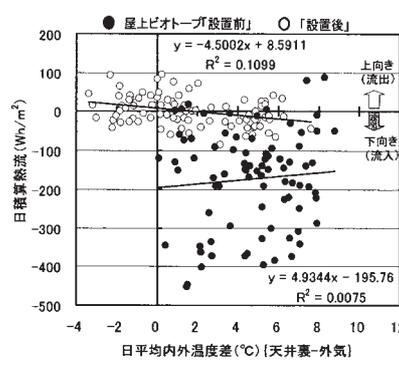


図-6 天井裏の内外温度差と屋根スラブ下面熱流との関係（夏季）

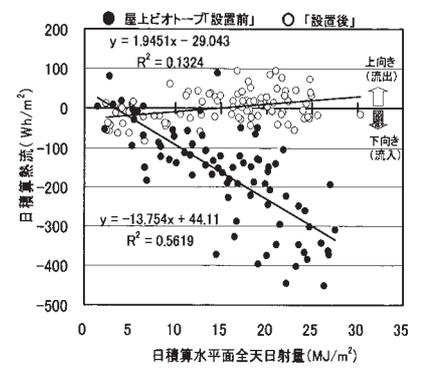


図-7 水平面全天日射量と屋根スラブ下面熱流との関係（夏季）

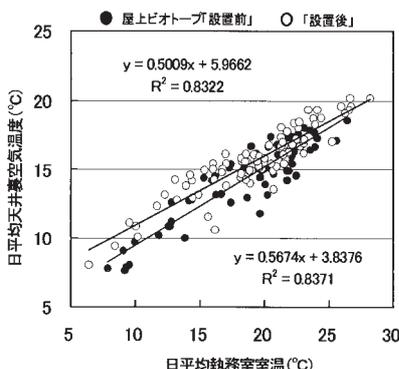


図-8 執務室室温と天井裏空気温度との関係（冬季）

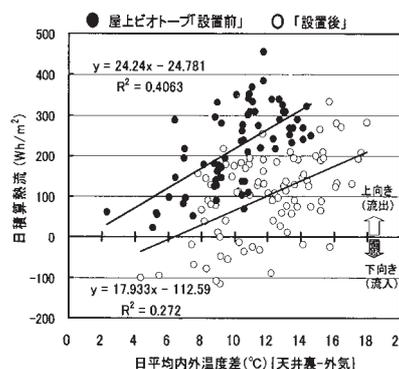


図-9 天井裏の内外温度差と屋根スラブ下面熱流との関係（冬季）

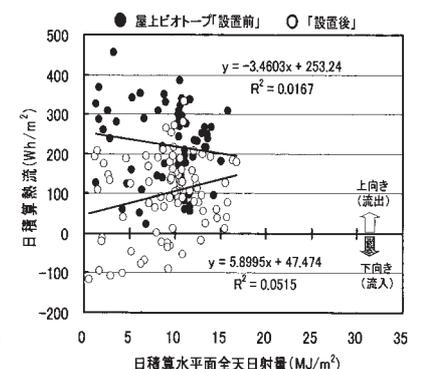


図-10 水平面全天日射量と屋根スラブ下面熱流との関係（冬季）

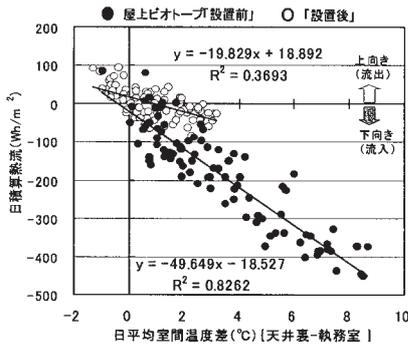


図-11 {天井裏気温-執務室室温}と屋根スラブ下面熱流との関係(夏季)

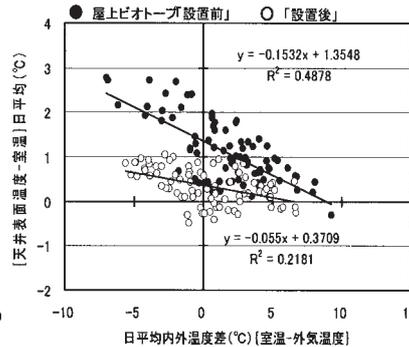


図-12 執務室の内外温度差と(天井表面温度-室温)との関係(夏季)

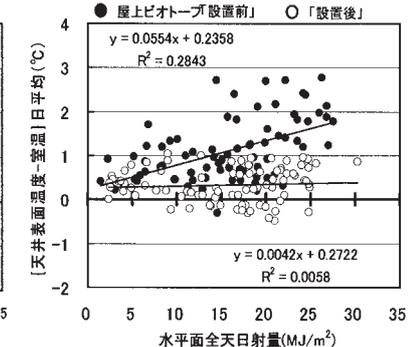


図-13 水平面全天日射量と(天井表面温度-室温)との関係(夏季)

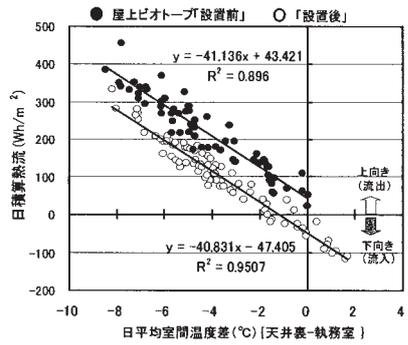


図-14 {天井裏気温-執務室室温}と屋根スラブ下面熱流との関係(夏季)

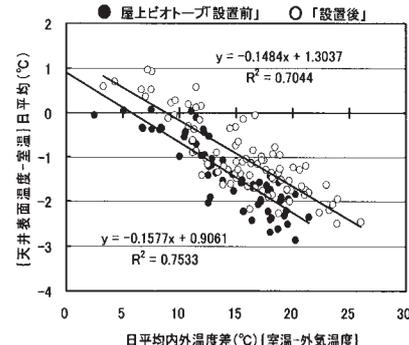


図-15 執務室の内外温度差と(天井表面温度-室温)との関係(冬季)

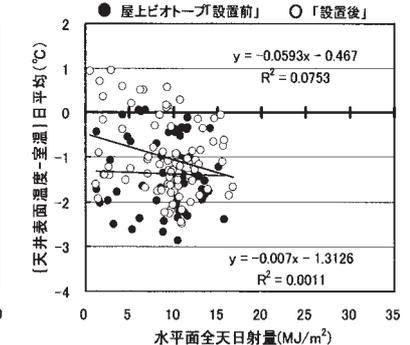


図-16 水平面全天日射量と(天井表面温度-室温)との関係(冬季)

の日射熱取得を減じていることが挙げられる。また、設置前後で暖房停止後の室温低下にさほど違いがみられず、室温の低下によって天井裏や屋根スラブ下面が夜間に冷却されていることが設置効果を減じている別の理由として挙げられる。これは、執務室の屋根以外の外皮の断熱性能が十分ではなく、非空調の実験室との間仕切に大面積の単板ガラスが用いられていることなどが影響しており、冬季の居住性の改善や暖房エネルギー削減にはこれらの点への配慮が必要と考えられる。

3.3 長期実測データに基づく屋上ピオトープ設置前後の比較

この分析に用いた実測データを表-2に示す。測定点3ヵ所(図-1参照)の平均値を用い、欠測日を除外したこの期間の日平均値、日積算値で整理した。屋上ピオトープ設置前後の夏、冬それぞれの平均外気温や日射量、及び執務室の使われ方はほぼ同様である。

3.3.1 屋上スラブ下面熱流

図-5, 8に執務室室温と天井裏空気温度との関係を示す。夏季は、ピオトープ設置前・後で両者に相関が認められるが、設置前は執務室室温が同等の日であっても天井裏空気温度のバラツキが大きい。回帰式よりこの実測期間の平均としては、ピオトープ設置により執務室室温を基準として約2.5℃天井裏の日平均気温を引き下げる効果があったといえる。これに対して冬季は、ピオトープ設置前・後、いずれも両者に高い相関が認められ、設置により執務室室温を基準として日平均1.0~1.5℃程度、天井裏の気温が高めに保持されているとみなせる。

図-6~7、図-9~10に天井裏の内外温度差及び水平面全天日射量と屋根スラブ下面熱流との関係を示す。夏季は、屋上ピオトープ設置前で内外温度差の影響は小さく日射が熱流に大きな影響を及ぼしていること、設置後はいずれの相関も小さいことがわかり、ピオトープの設置が夏季の日射遮蔽に有効に作用していることが確認できる。冬季は設置前・後いずれの場合も日射の影響は小さく、相対的に内外温度差との相関がやや大きくなる傾向にある。

日射や外気温のほかに屋根スラブ下面熱流に影響を及ぼす因子として、執務室の室温が挙げられる。図-11, 14に執務室と天井裏の気温差と屋根スラブ下面熱流との関係を示す。ピオトープ設置前は夏冬共に両者に高い相関があり、両室の日平均気温差が大きい程、日積算熱流も大きくなる。夏の設置後は日射の影響が抑えられることで両室の気温差が小さくなっているが、冬の設置後では日積算熱流は小さくなるものの気温差自体は設置前と大きくは変わっていない。これは前述したように外気温の低い冬季には屋根スラブ以外の外壁や間仕切り壁、床の断熱性とその影響が卓越しているためと考えられる。また、夏の日積算熱流は設置前で450~100Wh/m²dayに分布していたが、設置後には100~100Wh/m²dayに改善されている。冬は設置前・後で日積算熱流の最大値に大きな違いがみられないが、両室の日平均気温差を基準とすると設置後には平均的に約100Wh/m²day程度の熱損失(流出)を抑制する効果があったといえる。

3.3.2 執務室天井表面温度

執務室の天井表面温度と室温との差(以後、室温・

天井面温度差と呼ぶ)は天井面と室内空気との間で生じる対流熱伝達(熱負荷)に関わる因子であるとともに、室内の輻射環境にも影響を及ぼす。これと、内外温度差(執務室室温-外気温度)及び水平面全天日射量との関係を図-12, 13、図-15, 16に示す。夏季はビオトープ設置前に比べて設置後の相関が相対的に小さい。設置前では外気温度が執務室室温に比べて高い日ほど、日射量が大きくなる日ほど、室温・天井面温度差が大きくなる。これに対し、冬季は設置前・後共に日射量の影響は小さくて内外温度差の影響が相対的に大きいことがわかり、外気温度が室温に比べて低い日ほど室温・天井面温度差が大きくなる。

屋上ビオトープの設置により、執務室の内外温度差を基準とした室温・天井表面温度差は夏季に日平均0.5~1.5℃程度、冬季に日平均0.5℃程度小さくなり、天井面を通しての熱負荷が軽減されていると共に室内の輻射環境も改善されていると考えられる。

4. 実測に基づく屋根スラブ及びビオトープ設置屋根スラブ(緑化屋根スラブ)の熱貫流率の推定

ここでは、最近までの長期実測データを基に、屋根スラブ及びビオトープ設置屋根スラブの平均熱流と平均実効温度差との関係からそれぞれの熱貫流率を推定する。図-17に実効温度差に関わる因子を示す。まず、実測期間2001年6月~2004年9月における冬季(12月~翌年2月)、夏季(7月~9月)それぞれ1ヶ月毎に各実測値の平均を算出し、測定点3ヵ所の平均実効温度差 $\Delta\theta$ (月平均)を求める。

$$\Delta\theta = \theta_i - \theta_e \quad \dots \quad (1)$$

ここで、

θ_i : 天井裏空気温度 [℃]

θ_e : 相当外気温度 [℃]

θ_e は下式で与えられる。

$$\theta_e = \theta_o + a(IH + IR) / \alpha_o - \varepsilon IL / \alpha_o \dots \quad (2)$$

ただし、

θ_o : 外気温度 [℃]

IH: 水平面全天日射量 [W/m²]

IR: 隣接する北側壁面からの反射日射量 [W/m²]

$$IR = \rho I_s \phi S_n / S_b$$

I_s : 南鉛直面全天日射量 [W/m²]

ρ : 北側壁面の日射反射率

ϕ : 北側壁面、屋上ビオトープの面形態係数

S_n : 北側壁面面積 [m²] : 屋上面積 [m²]

IL: 夜間ふく射量 [W/m²]

a: 屋根スラブまたは緑化屋根スラブ外表面の日射吸収率

α_o : 屋根スラブまたは緑化屋根スラブ外表面の総合熱伝達率 [W/m²K]

ε : " " " " の輻射率

表-3 に日射吸収率等の実効温度差計算上の仮定及び設定条件、図-18に熱流と実効温度差との関係を示す。誤差はあるが、植栽基盤の無いビオトープ設置前は、回帰式の傾きが屋根スラブの熱貫流率にほぼ相当していると考えられる。図面の仕様から算定したビオトープ設置前の屋根スラブ熱貫流率は2.44W/m²Kであるのに対し、回帰式の傾きから推定される熱貫流率は2.28W/m²Kであり、ほぼ両者は近い数値となった。ビオトープ設置

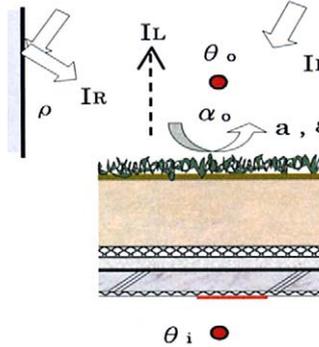


表-3 主な仮定及び設定条件

1) 屋上の日射吸収率 a	
シタ-コンクリート表面	0.7
植栽(芝)	夏 0.8
冬	0.7
2) 外表面総合熱伝達率 α_o	23.3 [W/m ² K]
3) 北側壁面日射反射率	0.15
4) 夜間ふく射量:	考慮しない
5) 南鉛直面全天日射量:	同一敷地内における過去の実測データ(水平面全天日射量との関係式)から推定

図-17 実効温度差に関わる因子 (記号説明は本文中に記載)

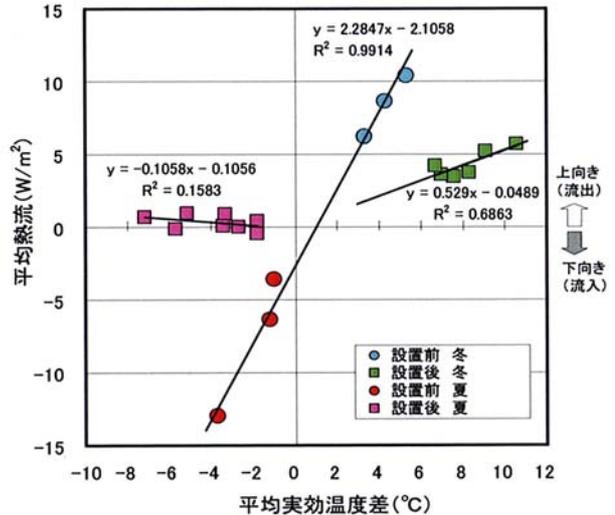


図-18 屋上ビオトープ設置前後の月平均熱流と月平均実効温度差との関係

後は、実測した熱流に植栽や土壌の蒸発冷却の影響が含まれているため、回帰式の傾きはその影響を含みかけ上の熱貫流率である。図面の仕様による算定値は0.36W/m²Kであるのに対し、冬の回帰式の傾きによる推定値は約0.53W/m²Kであった。これに対し、夏は相対的に植栽や土壌の蒸発冷却効果が効いてくるため、実効温度差の絶対値が増加しても熱流はほとんど増加しておらず、みかけ上の熱貫流率は非常に小さな値となっていることがわかる。

5. おわりに

屋上ビオトープの設置による夏季の室内への熱流入防止効果が特に大きいことを示すと共に、屋上ビオトープ設置前後の実質の熱貫流率を長期間にわたる実測データから推定した。次報では、維持管理等の側面からのモニタリング結果について報告する予定である。

文献

- 三浦寿幸: 都市型ビオトープ、総合政策提案誌「新政策」特集号 地球温暖化対策への技術開発 2003年1月 p.73-74
- 宮本徹、三浦寿幸、石田晶久、篠崎徹、浦田裕司: 屋上ビオトープに関する研究 その1、その2 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2 分冊 2004年8月 p.5-8
- 何江、梅干野晃、王革、堀口剛、屋上芝生植栽の熱的特性に関する実験研究 その10 芝生の伝熱モデルについて、日本建築学会大会学術講演梗概集 1993年9月 p.1529-1530