

B-56 環境低負荷型オフィスビルにおける地球・地域環境負荷低減効果の検証

(1) 研究棟における熱の挙動モニタリング及び各種対策技術効果検証実験

独立行政法人国立環境研究所

地球環境研究センター

一ノ瀬俊明・吉田友紀子・新津潔・平野勇二郎*

* 平成14年12月より日本学術振興会特別研究員、平成16年4月より国立大学法人埼玉大学

東京理科大学理工学部

井上隆・百田真史

〈研究協力者〉 東京理科大学大学院

蓮沼周

東京大学大学院

山本奈美

平成13～15年度合計予算額

50,123千円

(うち、平成15年度予算額

14,914千円)

〔要旨〕様々な環境保全手法を取り入れて平成12年度に建設された国立環境研究所地球温暖化研究棟(4884.58㎡、3F、RC構造)において、放射と熱の挙動に関する通年モニタリングを実施し、個別の環境保全技術の環境負荷低減性の比較検討及び評価を試みた。

自律的に白濁することにより日射遮蔽・調光を行う自律応答型調光ガラスについて、事前検討により、放射環境を含む温熱環境及び白濁頻度の観点から良好との結果が得られた仕様を、深い庇、高アルベド化したバルコニーと組み合わせ、南面2、3Fの研究室部分に導入し、実気象下での室内環境及び省エネルギー効果の観点から評価した。温熱環境及び光環境の実測により、深い庇及び自律応答型調光ガラスの白濁変化によって、日射は概ね適切に制御され、Low-E膜の採用により冬期のコールドドラフトも抑えられ、年間を通して窓近傍の室内環境が良好に保たれていることが確認された。また、通年でフロア、ウイング毎の空調消費熱量、照明電力量の実測を行った結果、各季節において照明電力は窓面日射量の増加に伴い減少する傾向が見られた。以上のことより、日射熱の流入を抑制しつつ自然光を有効に利用できており、本建物の窓周りの外皮計画の有効性を確認できた。さらに、アンケート調査では自律応答型調光ガラスの白濁変化は概ね受け入れられ、温熱・光環境ともに概ね良好な評価が得られた。

また、屋上緑化面(セダム植栽地等)における放射収支観測、地中温度、地中熱貫流を観測し、当該屋上緑化面周辺における放射と熱の挙動の定量化を試み、屋内外の熱環境に与える影響に関する考察を行った。セダムを屋上に植栽することにより地表面温度を低下させると同時に、その日変化をも小さくするため、周囲の大気への影響を軽減することが期待できることが明らかとなった。

〔キーワード〕自律応答型調光ガラス、自然光利用、熱フラックス、灌水、屋上緑化

1. はじめに

地球環境保全に配慮した建築手法として、地球温暖化防止に有効な熱負荷低減手法などの様々な提案が先進国でなされており、日本においても建設省官庁営繕部が「グリーン庁舎計画指針」

を策定するなど、積極的な対応を図っている。しかしながら各手法の効果については、提案されて日が浅いこともあり、具体の事実で確認された例は非常に少ない。日本はその気候柄、欧米諸国で開発された手法をそのまま取り入れるには困難な事柄も多く、特に喫緊に検討すべきは日射遮蔽と自然光利用の併用の可能性である。平成11年度末に国立環境研究所敷地内に地球温暖化研究棟の建設が着工され、13年度当初より供用が開始された。この研究棟自身にも多くの地球環境保全手法が採用されており、継続的なモニタリングにより、各手法のより効果的なディテールや方針が検討されうるものと期待されている。

2. 研究目的

平成12年度に国立環境研究所敷地内に建設された地球温暖化研究棟（4884.58m²、3F、RC構造）には各部に様々な環境保全手法が取り入れられていることから、本研究では、研究棟の各部位における放射と熱の挙動に関する通年モニタリングを通じた個別技術毎の環境負荷低減性の比較検討及び建物全体のLCA評価を行う。また、アメニティーを含めたオフィス（研究棟）内外空間の快適性向上の検討や日本の気象条件、建物使用実態に即した環境負荷低減手法の効果の確認を行う。さらに、エネルギー消費行為から大気への放熱に至るまでの躯体内部の詳細な熱挙動の把握とモデル開発を通じて、大規模に環境低負荷技術が普及した場合のヒートアイランド低減効果などによる副次的環境負荷低減効果を明らかにする。そのために都市気候数値モデルにおける人工排熱の取り扱い方の確立、屋外熱環境に対する建物内部の人間活動の影響のリアルタイムでの把握を行う。以上を通じて、個別建物から都市スケールまで建築における各種環境保全手法が導入された場合の環境負荷低減効果の定量化とコスト対効果の比較などによる技術評価を行うとともに、それら手法の効果的な設置法や現実的な活用法を提示することを目的とする。

我が国の執務空間におけるエネルギー消費の用途別内訳としては、冷房を主とした空調用が最大であり、照明用がこれに続くことが広く知られている。窓からの昼光を利用して調光・消灯すれば、照明用エネルギーの削減のみならず、照明発熱分だけ冷房負荷も削減されることになり、極めて大きな省エネルギー効果が期待できる^{1)~2)}。ただし、在室者にも受け入れられ、結果として省エネルギー効果を得るためには、温熱環境のみならず光・視環境、さらに開放感・視界・眺望など、極めて多岐にわたる要求に的確に応えることが前提となる。

著者らは、実態調査、アンケート調査などの結果に基づき、オフィスとしての執務空間を想定するならば、第一に満たすべきは、しきい値以上の直達日射の遮蔽、次いで開放感・眺望・視界の確保、しかる後で、昼光利用という優先順位になると考えている。既往の研究^{1)~4)}では、日射遮蔽と昼光利用を適切に行う、窓・ブラインドシステム及び昼光利用照明制御システムの組み合わせ制御により、快適環境と省エネルギーの両立を図った。しかし、より簡易で導入の容易なシステムへの要求も高く、本研究では、広範な普及を目指したシステムの検討を行うこととし、新素材である自律応答型調光ガラス（以下、TTガラス）に注目して、TTガラスとLow-E膜とを組み合わせ複層化し、外界の様々な状況に対し熱と光のコントロールが有効に機能するよう試みた。

また屋上緑化に関しては、その断熱性や蒸発散機能を通じた屋内空調負荷の削減効果、屋上面周辺大気に対する夏季の気温上昇抑制効果などが知られているが、それらの定量的な評価が十分なレベルにあるとは言いがたい。よって、屋上緑化面（セダム植栽地等）における放射収支、地中温度、地中熱貫流を観測し、当該屋上緑化面周辺における放射と熱の挙動の定量化を試み、屋

内外の熱環境に与える影響に関する考察を行うこととした。

3. 自律応答型調光ガラスの性能評価

(1) 研究概要

本研究では、比較的簡易な手法で快適環境性と省エネルギー性の両立を目指した各種技術を導入した建物を対象とし、事前の検討により選択した自律応答型調光ガラス（以下、TTガラス）とLow-Eガラスとの組み合わせの導入効果として、TTガラスの白濁状況・室内温熱環境実測・居住者へのアンケート調査を行い、さらに空調及び照明エネルギー消費実態把握を行うことにより、各種技術導入効果の把握を目的とする。

(2) 研究対象概要

① 建物概要

本建物は、『国立環境研究所 地球温暖化研究棟』（茨城県つくば市小野川16-2、RC造3階建、延べ面積4884.58㎡、平成13年4月竣工）である(図1)。国土交通省（旧建設省）官庁営繕部が策定している「グリーン省庁計画指針」に記載されている環境保全手法を計画時より積極的に採用し、かつ効果的なディテールや方針が発展的な研究内容の変遷に対応できるように計画している。本建物は地球温暖化に関する研究を主とする施設である。本建物の概要は図2に示すように東側ウィングを真南としたものであり、西側ウィングは約20° 東側に振れている。主な実測対象は、3階にある炭素吸収量解析室(図3)及びインベントリー評価室(図4)である。

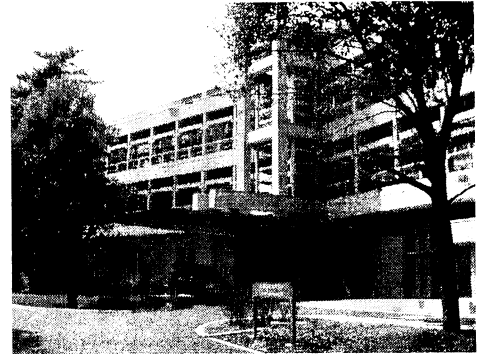


図1 対象建物外観

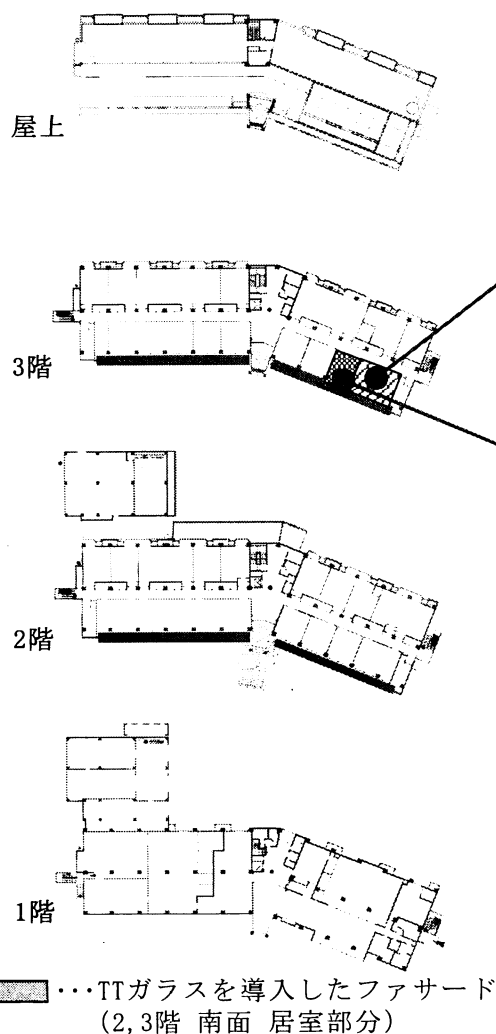


図2 各階フロア平面図



図3 炭素吸収量解析室



図4 インベントリー評価室

検討対象各ウィングの概要を表1に示す。東西で床面積に差はあるものの、人員密度、照明密度には大差が無い。

表1 各ウィング概要

ウィング名		面積[m ²]*1	人員密度[人/m ²]	照明密度[W/m ²]	TTガラス	アルミルーバー*2	バルコニーの高アルベド化*3
2階	西	263.5	0.10	12	なし	あり	なし
	東	183.9	0.07	12	あり	あり	なし
3階	西	261.8	0.07	12	あり	なし	あり
	東	183.9	0.07	14	あり	なし	あり

*1: 南面居室部分のみ

*2: 上段ガラスと中段ガラスの間の高さに庇と並行に取り付けられた垂直なルーバー

*3: 高反射率の塗料で、自然光を多く室内に取り込むことができる

2、3階南面居室は、自然光の取り込みを意図したはきだし窓とし、床上900mmを境に、下段には、TTガラスとLow-Eガラスを組み合わせた複層ガラス（室外側：Low-Eガラス、室内側：TTガラス）を、中段には日射の透過率を低く抑え、可視光透過率の高い遮蔽型Low-Eガラスを採用している（図5）。これに併せて図6に示すように1500mmの深い庇により、夏期及び中間期の直達日射の遮蔽を行うことで、在室者の視界を確保しつつも、TTガラスの有効利用を図っている。また、バルコニー面の高アルベド化、自然光利用照明制御との組み合わせにより、熱流入の抑制と自然光利用の両立を図っている。バルコニーの高アルベド化に関しては、その効果の程を検討できるよう3階のみの採用とされている（図7中○部分）。これに対し2階では、ライトシェルフ効果を狙ったルーバー（図7中□部分）を採用している。2階西においてはTTガラスが採用されておらず、遮蔽型Low-Eガラスを窓全面に採用している。

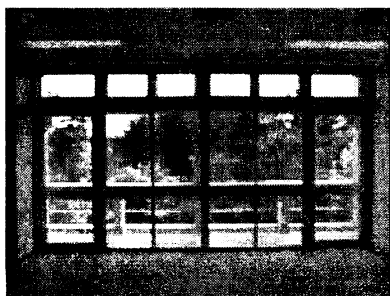


図5 窓周り内観



図7 各階バルコニーの仕様

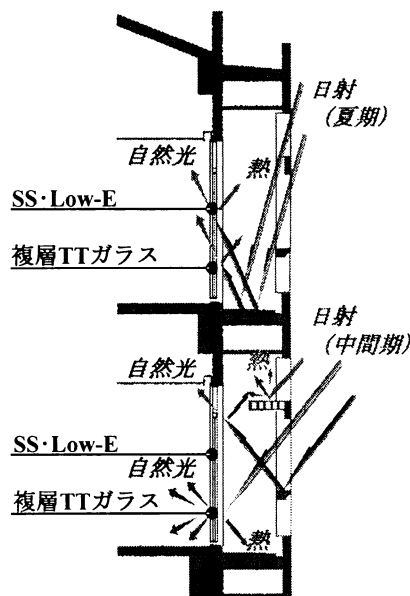


図6 窓周り断面

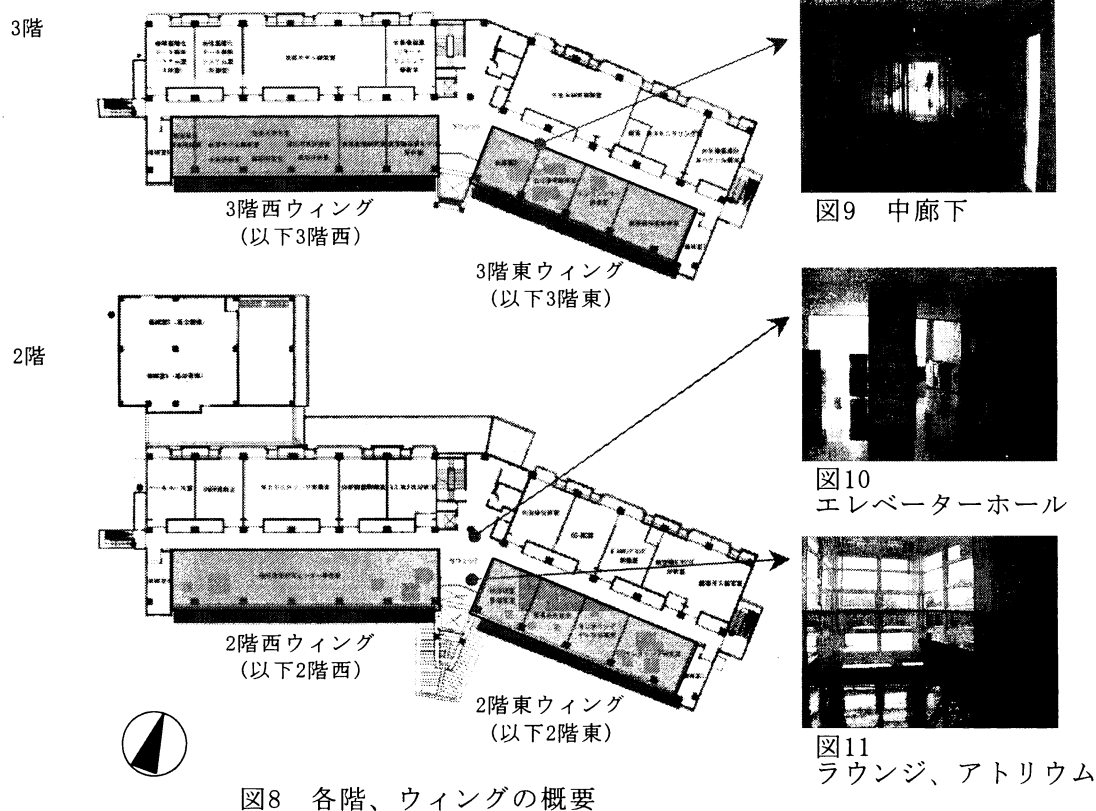


図8 各階、ウィングの概要

本建物は南北方向に開口を設けた形になっており、中廊下を挟んで南側が研究諸室、北側が特殊空調を必要とする実験諸室に割り当てられている(図8)。計測項目は、南面2、3階各ウィングの居室部分インテリアのAHUの各処理熱量(図8中■部分を個別に4系統)と、各居室部分ペリメータ、さらには中廊下(図9)、エレベーターホール(図10)、ラウンジ、アトリウム部分(図11)を全てまかなうFCUの処理熱量(1系統)である。

FCUについては、中央管理センターによる全館一括の制御が行われており、居室での執務者による操作は不可能である。また、FCUの制御について、2003年03月までの実績((3)②で詳述)では冷房時の運転が少なく年間でAHUのみによる冷房が可能との判断から、FCUの稼働頻度低減を目的とし、2003年度6月より所内で通風換気を推進している。

以上のように、FCUについては階、ウィング毎での計測が行われておらず、さらに居室以外の部分もまかなっているため、処理熱量に関する厳密な分析は困難である。また研究所建物という性格上、入所者の勤務時間、在席時間等も流動的であり、さらには特殊空調の可能性も否定できない。本報告ではこれら諸事情を考慮し、建物レベルでのエネルギー消費量実績を対象としながらも、外界要因との関連性については可能な範囲での把握に留めている。

照明制御は、天井に設置された照度センサー(図12)により机上面照度を測定、昼光と人口光の合成照度が700 lxになるように連続調光している(出力値の下限值は設定されていない)。照明器具の配置は図13に示すように、室奥まで三列で分担、それぞれの窓面より1200mm、3550mm、5900mmの位置に配置されている。照度センサーは窓際及び室中央の天井面に一ヶ所ずつ設置され、窓際一列目の制御は窓際のセンサーにより、窓際二列目及び三列目の制御は室中央のセンサーにより一括で行っている。

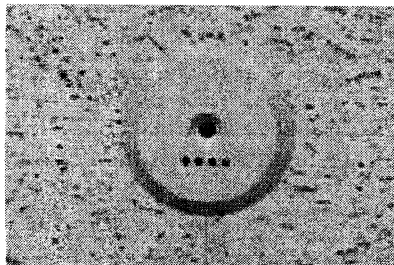


図12 照度センサー

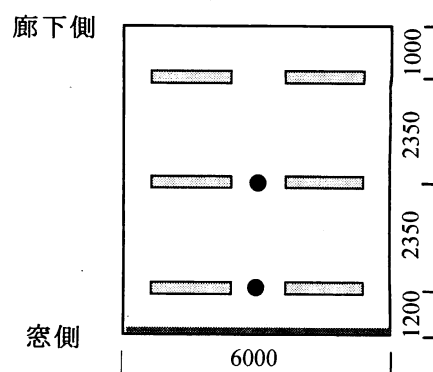


図13 照明器具配置図 (1スパン)

②自律応答型調光ガラス概要

本研究で対象とする自律応答型調光ガラス（Thermotropic glass；以下TTガラス）とは、板ガラス2枚の間にハイドロジェル（高分子材料溶液）をスペーサーとともに封入したガラスである。このハイドロジェルは、主に水・疎水基を持つ水溶性高分子・両親媒性分子・塩化ナトリウム等から構成されている。これらは温度相転移により、通常は無色透明のガラスだが、ある一定の温度（設定温度）に達するとガラス自体が白濁し遮蔽・調光を行い、また一定温度を下回ると透明に戻るガラスである（図15）。設定温度は、室温から60℃程度の広範囲で設定が可能である。白濁時は完全拡散に近い状況となり、直達日射の遮蔽と自然光利用に好都合な特性を持つ。

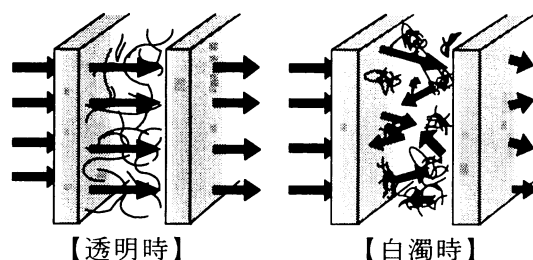


図14 自律応答型調光ガラス概要

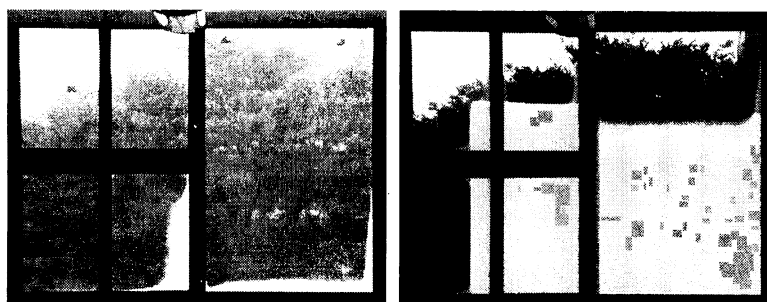


図15 自律応答型調光ガラス

TTガラスの物性を表1に、本建物に採用されている『SS・Low-E』、『LE+TT』の物性を表2に示す。

表1 TTガラス物性

品種	可視光		日射		熱貫流率 (W/m ² K)	日射熱 取得率(η)
	透過率(%)	反射率(%)	透過率(%)	反射率(%)		
FL5/ge10.5(Clear)/FL0.5	86.0	7.9	68.1	6.8	5.7	0.77
FL5/ge10.5(Diffuse)/FL0.5	18.4	36.0	14.5	26.8	5.7	0.35

表2 導入仕様物性

仕様	可視光透過率(%)		可視光反射率(%)		熱貫流率(W/m ² K)		日射熱取得率(η)	
SS・Low-e	69.8		12.1		2.55		0.42	
仕様	可視光透過率(%)		可視光反射率(%)		熱貫流率(W/m ² K)		日射熱取得率(η)	
	Clear	Diffuse	Clear	Diffuse	Clear	Diffuse	Clear	Diffuse
LE+TT	69.6	15.1	11	29.7	2.44	2.44	0.44	0.29

③窓面仕様詳細

2、3階南面居室にて採用した仕様は、TT ガラスと Low-E ガラスを組み合わせた複層ガラス（室外側：Low-E ガラス、室内側：TT ガラス、以下 LE+TT）を、中段には日射の透過率を低く抑え、可視光透過率の高い遮蔽型 Low-E ガラス（室外側：Low-E ガラス、室内側：普通ガラス）を採用している（図16）。

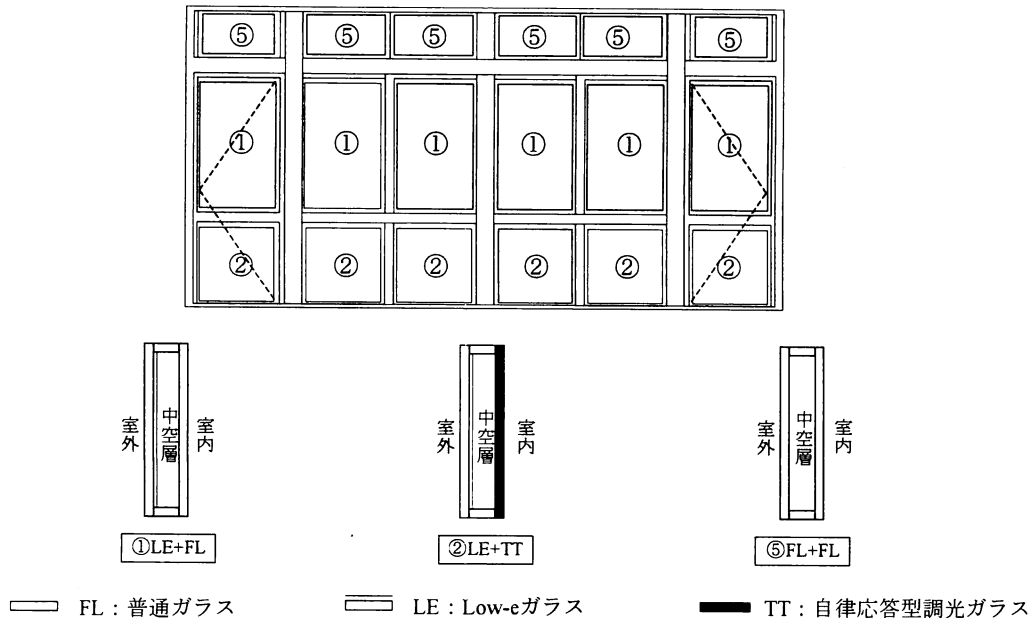


図16 インベントリー評価室の窓仕様（室内側）

2、3階南面居室のうち唯一、炭素吸収量解析室では、各ガラス仕様の評価、比較検討を想定し、以下に示す7種類のガラスの仕様を採用している（図17）。

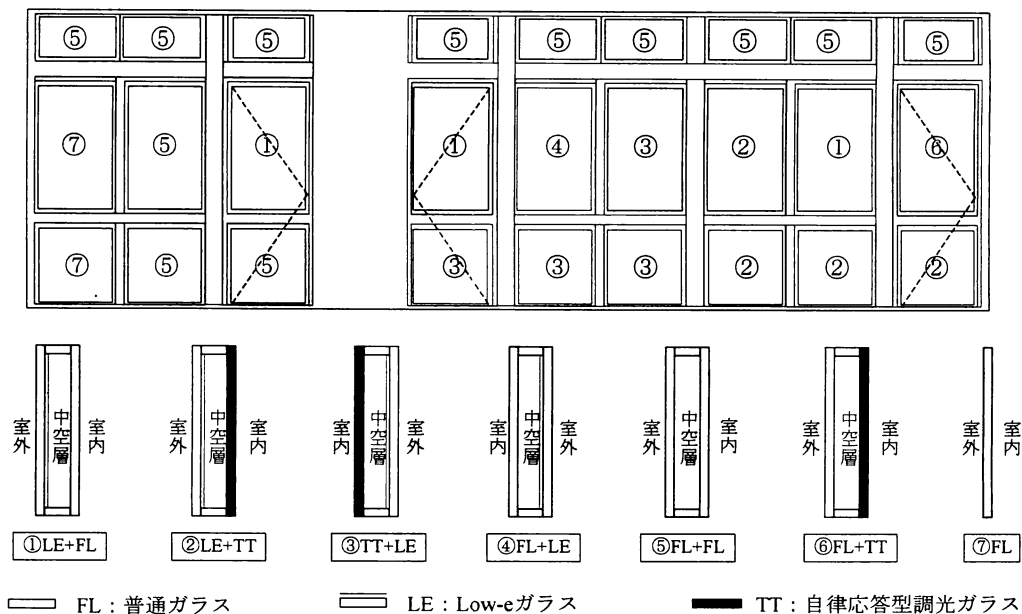


図17 炭素吸収量解析室の窓仕様（室内側）

(3) 結果と考察

①窓周りに関する検討

ア. TTガラス導入時の白濁状況

各期間の開口部及びTTガラスの白濁状況を示す(図18)。秋分における直達日射の入射は、下段ガラス部分のみにとどまり、夏期から秋分にかけては、一日を通して、深い庇とTTガラスの白濁により日射遮蔽が行われていたことがうかがえる。秋分以降は南中時にも中段ガラス部分からの入射が見られるようになるため、中段ガラス部分ではブラインドの使用が不可欠となる。TTガラスの応答を見ると、年間を通じて概ね適切に応答していることが分かる。特に秋分から中間期全般にかけては、直達日射の入射に対し応答が早い。また冬期においても、外気温の低さから白濁の開始がやや遅れる傾向にあるものの、適切に応答している。

ペリメータの上下温度分布を見ると、中間期、冬期を通して温度差は少なく、冬期に特に懸念されるコールドドラフトも抑えられていることが分かる。

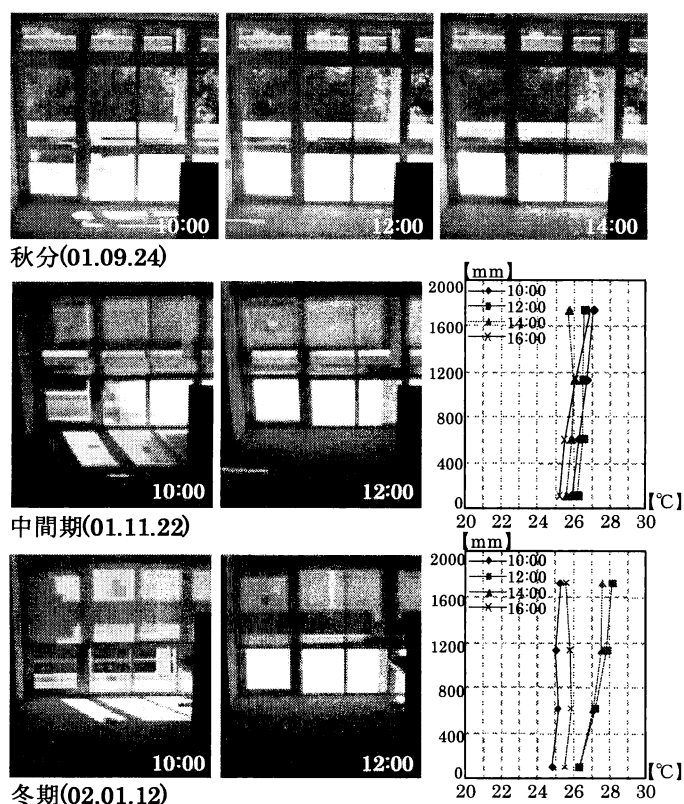


図18 日射入射・白濁状況及びペリメータ上下温度分布

イ．自律応答型調光ガラス経年評価

本報告にて行う空調負荷及び照明電力量に関する検討は、TTガラスが設計相転移温度で白濁していることが前提である。また、TTガラスのオフィス用途実在建物への適用事例は初めてであり、耐久性や経年劣化について検討した事例も皆無であり、この意味でも本建物におけるTTガラスの経年評価は不可欠と考える。

ここでは、導入後約二年経過した時点での、TTガラスの白濁状況と熱画像により、設計相転移温度（本建物では30℃）にて白濁変化していることを確認する。

代表日の内外条件を図19に示す。日射量は一日を通して安定している。一時的に急激な落ち込みが見られるのは（図19中○部分）、建物前の樹木により日射が遮られる時間帯にあたる。冬期の南面における日射量はどの方位よりも大きく、日最高値で880W/m²付近まで上昇する。外気温は一日を通して低く、日最高値で11℃程度である。

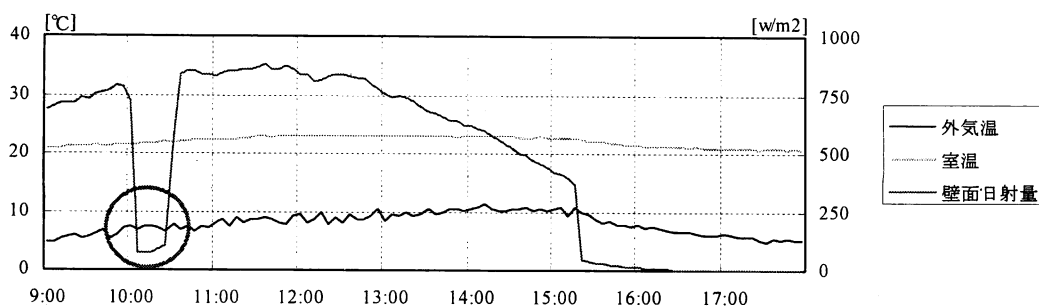


図19 内外条件 (02/12/14)

計測結果を図20に示す。下段に設置されたTTガラスは、いずれの時間帯においても、設計相転移温度である30℃を境に白濁部分と透明部分とが構成されている。また、白濁部分の室内側ガラス表面温度はいずれも32℃前後に保たれていることから、日射熱を吸収した窓面からの再放射（長波長放射）についても、問題視されるレベルではないことが分かる。さらに可視画像から、ブラインドにより日射を遮蔽した上段部分（遮蔽型Low-Eガラス）に比べ、自然光を有効に取り込めていることが分かる。以上より、竣工後の時間経過を受けても、TTガラスは所期の性能を保持していることが確認出来た。さらに、導入後約三年経過した現在に至るまで、TTガラスは所期性能を保持していることを確認している。



図20 白濁時の可視画像及び熱画像 (02/12/14)

ウ. アンケート調査結果

執務者を対象とし、TTガラスの印象、快適性に関するアンケート調査を中間期（'01年11月実施、配布数36、回収数28）及び冬期（'02年1月実施、配布数34、回収数21）に実施した。執務者がTTガラスに抱いた印象では（図21）、「特に気にならない」の回答が最も多く、次いで「直達日射を遮るために便利」という結果であり、TTガラスの白濁変化は執務者に概ね受け入れられていることがわかった。また快適性の評価については（図22）、簡易型制御のブラインド内蔵空気循環二重窓を採用している「Nビル³⁾」の調査結果を比較対象として評価を行った。結果を見ると「快適」「やや快適」が「全体」の7割以上、「窓際2m以内」で8割を占め、Nビルに比べ簡易な外皮計画でありながら、快適性については遜色のない評価が得られたといえる。

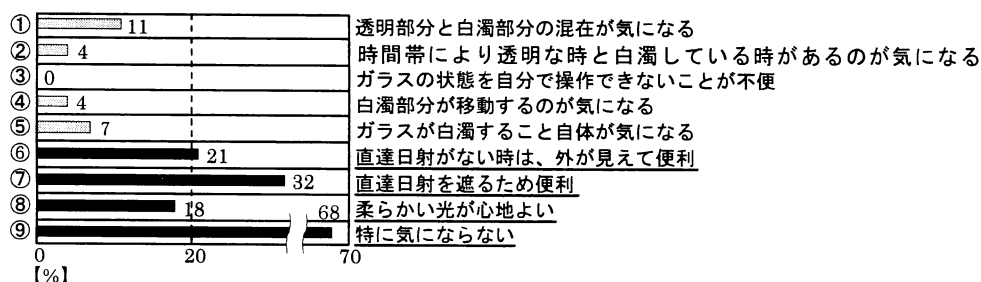


図21 TTガラスの印象

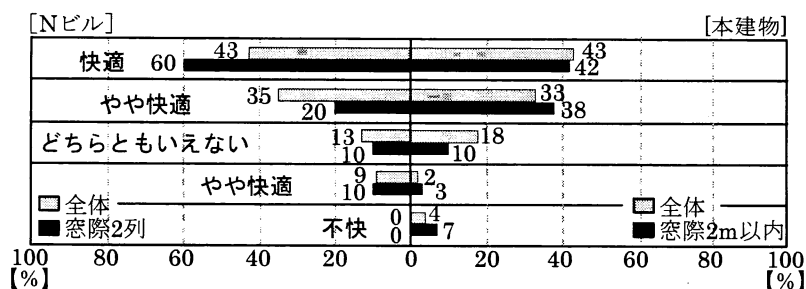


図22 快適性の評価

次に執務者を対象とし、夏期、中間期、冬期、の快適性に関するアンケート調査（'03年1月実施、配布数67、回収数51）の調査結果を示す。調査結果に関しては、日射の影響を受けやすい「窓際2m以内」と「全体」に分類し、集計した。温熱環境に関しては（図23）、「全体」、「窓際2m以内」とともに年間を通して「快適」、「やや快適」の回答が7割以上を占めている。また、光環境に関しては（図24）、「全体」では「快適」、「やや快適」が9割以上、「窓際2m以内」でも、冬期において若干「やや不快」の回答があるものの、8割以上を占めており、温熱・光環境ともに、概ね良好な評価を得た。

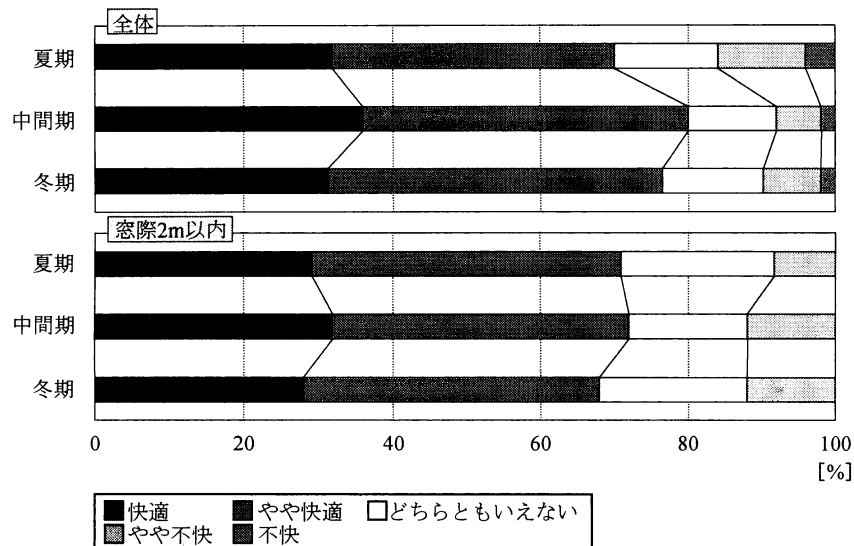


図23 温熱環境に関する評価

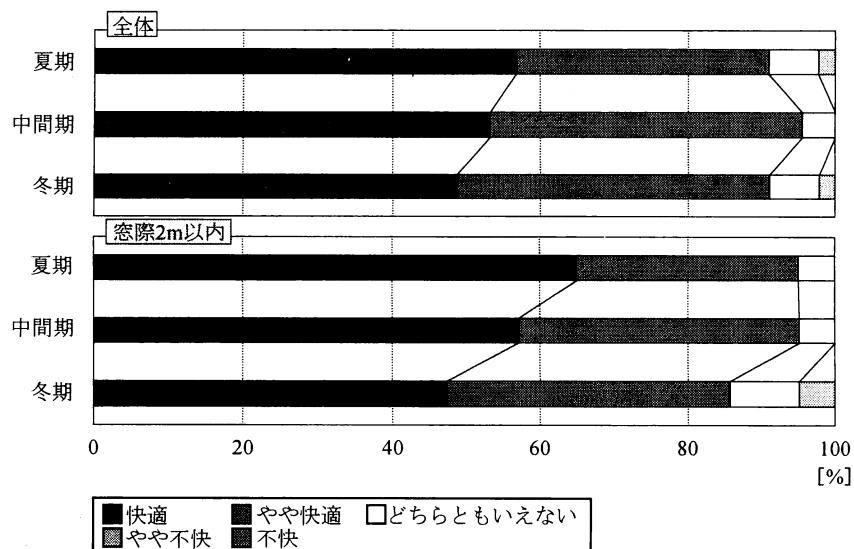


図24 光環境に関する評価

エ．断熱性能に関する検討

TTガラス単体では断熱性向上は見込めず、複層化及びLow-E膜との適切な組み合わせが必須である。さらに、本建物に採用した仕様で考えるならば、TTガラス透明時であっても遮蔽型Low-Eガラスと同等の性能が確保出来る上、白濁時における日射熱取得率の低減にも有効であり、日射遮蔽性能の向上にも寄与する。オフィスという条件下では、年間を通して冷房負荷の割合が非常に大きく、断熱性の向上を暖房負荷対策としてだけ考えるならば、さほど重要視されるものではない。しかし、冬期の窓近傍での結露、冷放射、コールドドラフトの抑制、さらにはミキシングロスの防止など、断熱性の低下によって引き起こされる諸問題への対策として重要な意味合いを持つ。図25に、日没後、炭素吸収量解析室の一面にて撮影した熱画像を示す（日没後は、外気温が低下するため室内外の温度差が生じ易く、断熱性能の違いが顕著になる時間帯である）。複層ガラスは、普通単板ガラスと比較して、室内側ガラス表面温度が約4℃高い。遮蔽型Low-Eガラスでは、さらにガラス表面温度が約1℃高く、室温に近い水準を保っている。以上の結果より、複層化及びLow-E処理が窓面における断熱性向上を図る上で有効な手法であることが確認出来る。

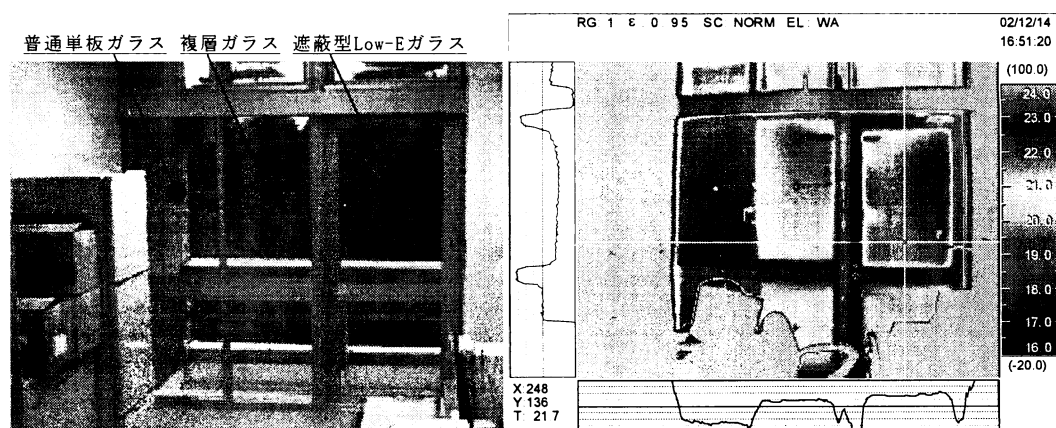


図25 断熱性能の比較 (02/12/14)

オ．反射光導入に関する検討

バルコニー面の反射率に関する比較実験の結果を図26に示す。晴天日のほぼ同時刻に、バルコニー面に暗幕を施し一時的に反射率を低くした場合と、施さない場合との2通りの状況で、室内をデジタルカメラで撮影し、撮影画像をもとに輝度分布図を作成した。この結果から、バルコニー面の高アルベド化が、机上面照度の向上に大きく寄与していることが分かる。

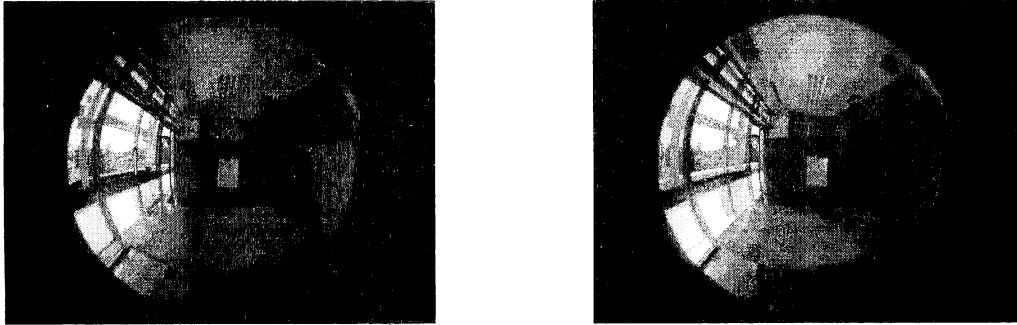


図26 バルコニー面反射率が室内輝度に及ぼす影響

②空調実態把握

本項では本建物で導入した省エネルギー計画が所期の性能を発揮しているかを把握するために、年間での空調負荷変動、外界条件との相関、季節ごとの相関について検討を行った。

ア．年間での空調負荷変動

計測期間内のエネルギー消費量実績と、外界条件との関係を概観する。

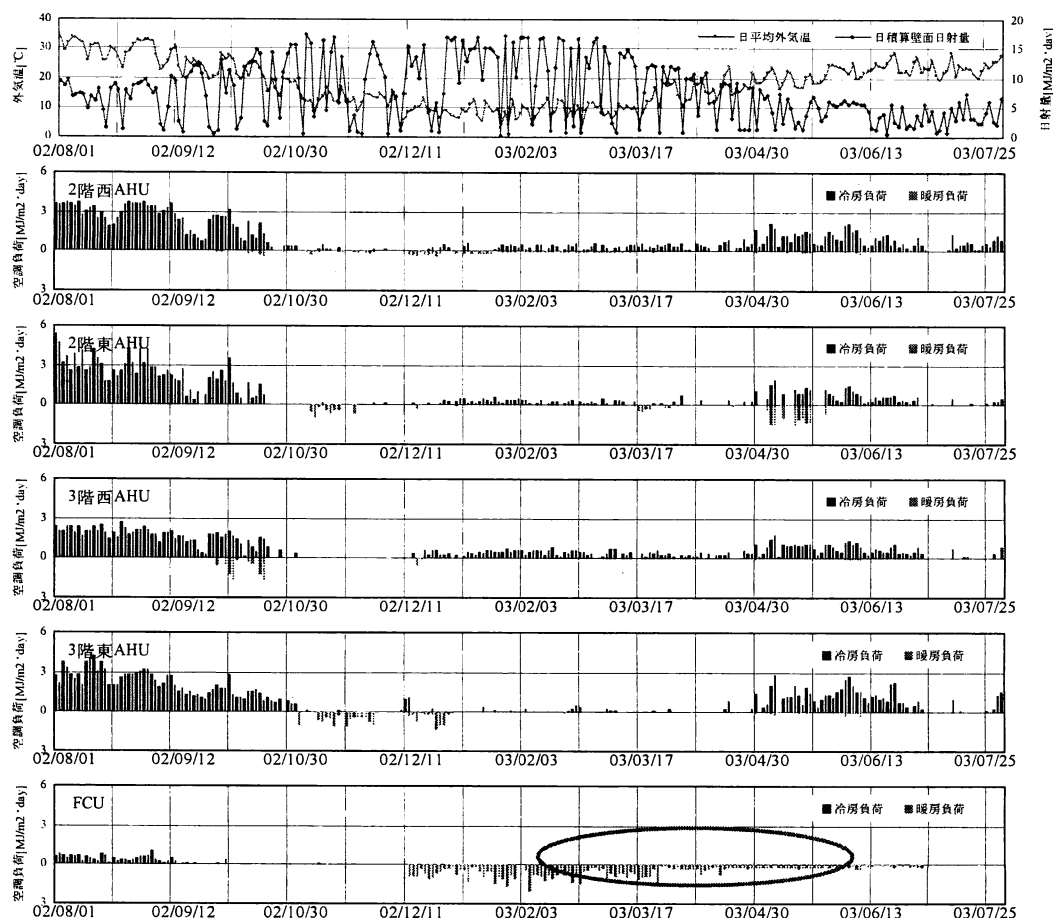


図27 日積算空調負荷と気象要因の関係（年間）

図27は外界条件と、階、ウィング毎の処理熱量の関係を年間で示したものである。処理熱量は勤務時間内の積算値を用いている。また、ここでは検討対象外である休日及びデータ欠損日は示していない。

図27より、冷房負荷と暖房負荷ではその傾向が大きく異なることが分かる。冷房負荷は基本的にAHUで処理されており、FCUは外気温の高い時期に補助的に用いられている程度である。AHUについては各階、ウィングで処理熱量に差があるものの、大小関係は年間を通じて大きな変化が無い。これに対し、暖房負荷はその殆どがFCUで処理され、AHUで処理している期間においては、各階、ウィングでの大小関係も期間により様々である。暖房期において、FCUの出力がAHUに比べ多対であることに対し、予想される最も大きな要因としては、AHUが居室部分のみをまかなっていることに対し、FCUは居室部分以外に中廊下、エレベーターホール、ラウンジ、アトリウムなど、居室部

分に比べ内部発熱量の非常に小さな空間（アトリウム周辺に関しては、外気温の影響も多大である）を同時にまかなっていることが挙げられる。暖房運転時は、設定室温と外気温との差が大きい点で冷房運転と大きく異なる。よって、冬期におけるこれらの空間の暖房負荷は多大なものであったものと予想される。また、FCUの出力が外気温の変動に関わらずほぼ一定のとなっている期間が見られる（図中○部分）。同期間については、夜間においても同様に一定の出力がなされていることを確認しており、特殊空調が行われていた期間と推測される。

以上のように、暖房運転については不確定要因が多数存在することから、本報告での検討は冷房負荷を中心に進めることとする。

イ．年間における冷房負荷と気象要因の関係

各期間、平日勤務時間帯における冷房負荷と壁面日射量及び外気温との関係を示す（図28、図29）。

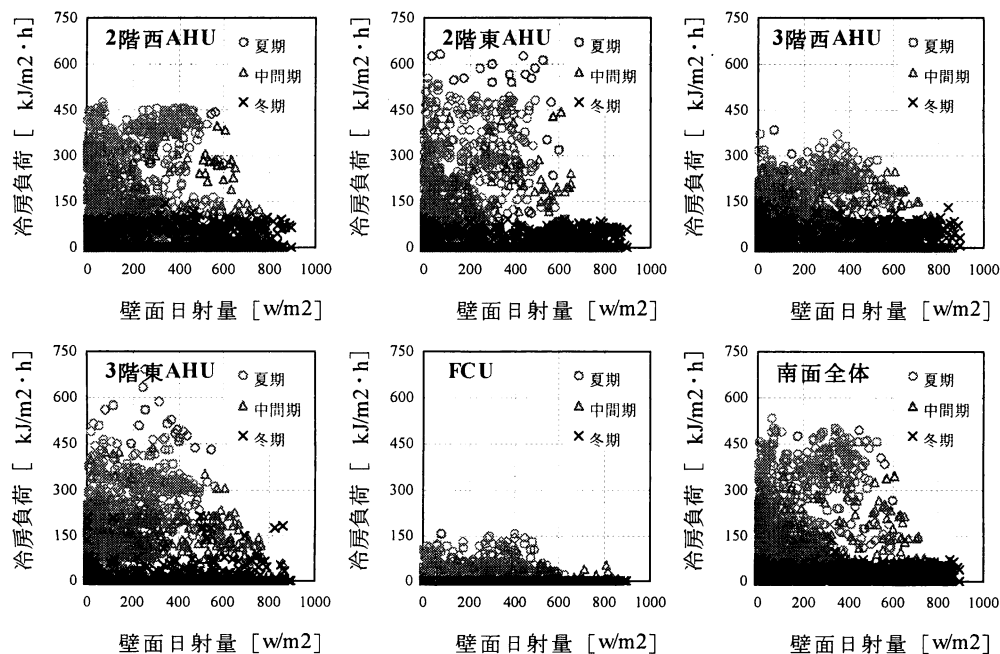


図28 冷房負荷と壁面日射量との相関

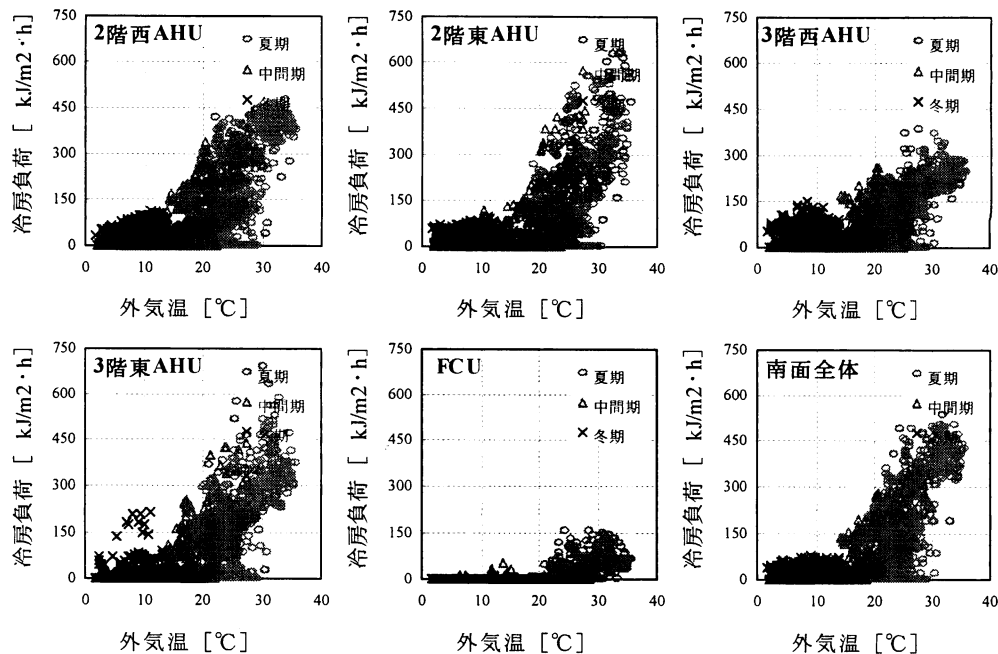


図29 冷房負荷と外気温の相関

AHUは夏期、中間期、冬期いずれの期間においても、冷房負荷と壁面日射量との間には相関が見られない。また、ペリメータのFCUは夏期及び中間期の一部の、外気温の高い期間においてのみ負荷を処理している。FCUでは外気取り入れを行わないことから、FCUの負荷は日射、窓貫流及び内部発熱によるものと思われるが、気象要因の影響を受け易い窓近傍において、冷房の使用頻度、処理熱量共に、非常に少なかったことが分かる。

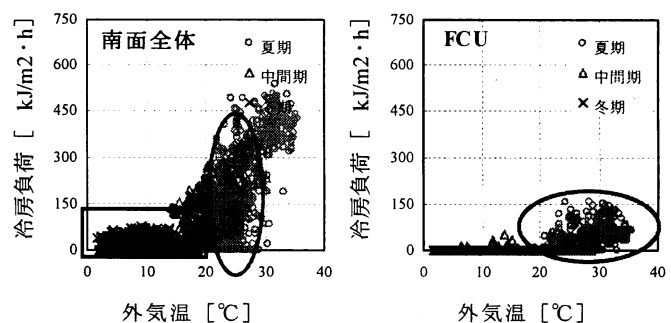


図30 外気温との関係

ここで、事務室部分が奥行き7mに満たない計画であり、室全体が外乱の影響を受けやすいことを考慮するならば、室全体の冷房負荷に注目すべきであるが、AHU、FCU両者の処理熱量の合計（南面全体）を見ても、日射による影響は小さい。

以上、本建物の外皮計画により、冷房負荷に及ぼす日射の影響は大幅に減じられていたといえる。

しかし、外皮性能以外の要因、すなわち制御方法や所内での空調の使用状況などの影響が伺える部分もある。具体的には、夏期において（図30中○部分）、同程度の外気温の場合にも、負荷は小さい場合と大きい場合がある。さらに、中間期よりも外気温が高いにもかかわらず、冷房負荷は中間期よりも小さなプロットも確認できる。また冬期においては、外気温の低下に対して、冷房負荷の減少が見られない（図30中×部分）。これらの事柄について、その要因を探るべく、以降、各期間においてさらに詳細な分析を行う。

ウ．夏期及び中間期における検討

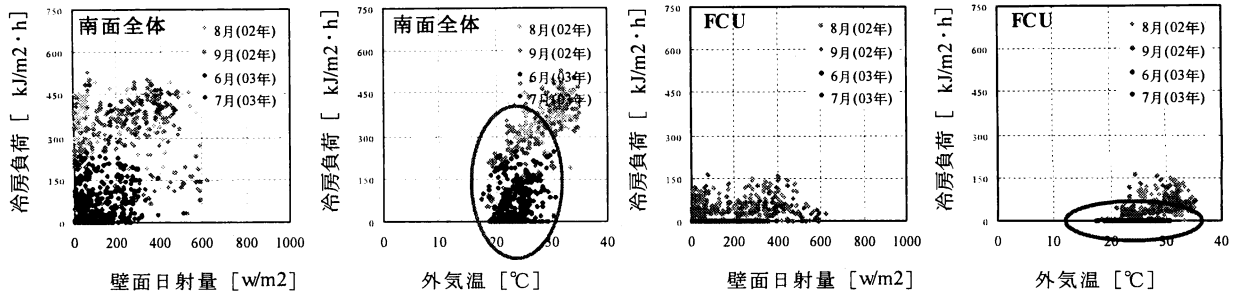


図31 冷房負荷と気象要因の相関（夏期）

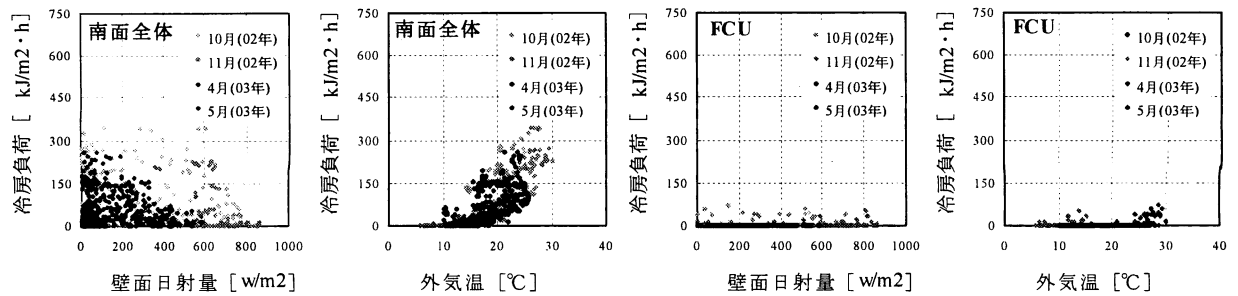


図32 冷房負荷と気象要因の相関（中間期）

図31及び図32をみると、冷房負荷については両期間とも、壁面日射量とは相関がみられない点で共通しているが、外気温との関係では傾向が異なる。中間期においては、外気温の上昇に伴い冷房負荷も増加し、両者は高い相関を示すのに対し、夏期においては、同程度の外気温の場合にも、2003年度分のデータの方が負荷の小さな領域にプロットされている（図31中○部分）。とくにFCUにおいてその傾向は顕著であり、2003年度は4～7月までFCUが全く使用されていない。これは2003年度6月より所内で通風換気が推進されたことが最も大きな要因と考えられる。

南面全体について2003年度分5月以前と6月以降を比較すると（図33）、後者は、前者に比べ外気温が高い場合にも冷房負荷はさほど増加していない。高層建築においては、窓開閉による通風換気は困難であるが、本建物のような低層建物においては、冷房負荷及び窓際空調機の使用頻度の低減に効果的な手法になりうるといえる。

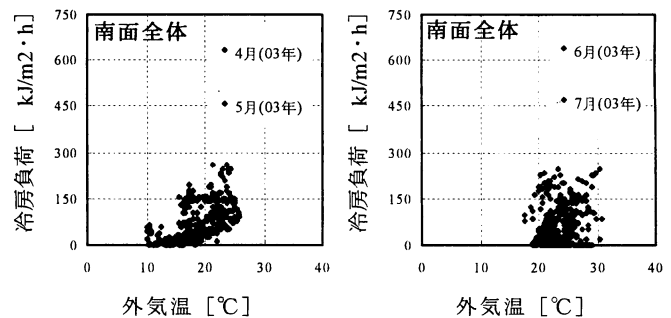


図33 通風換気の効果

以上、夏期及び中間期においては、通風換気が冷房負荷低減に寄与した部分もあるが、いずれの期間においても日射の入射による負荷増大の傾向は見られず、外皮計画の有効性が確認出来た。

エ. 冬期における検討

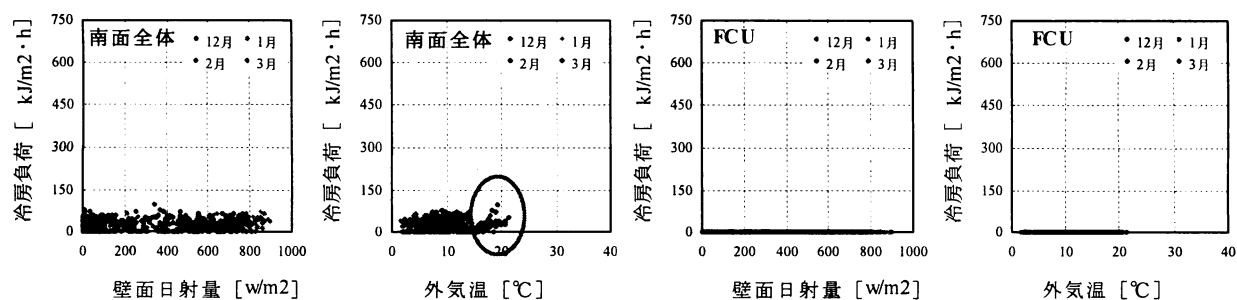


図34 冷房負荷と気象要因の相関（冬期）

南面全体について外気温との関係を見ると、外気温の低下にも関わらず冷房負荷は減少しておらず、外気温が比較的高くなる3月と比べてもそれ以前の月の空調負荷は大きい（図34中○部分）。

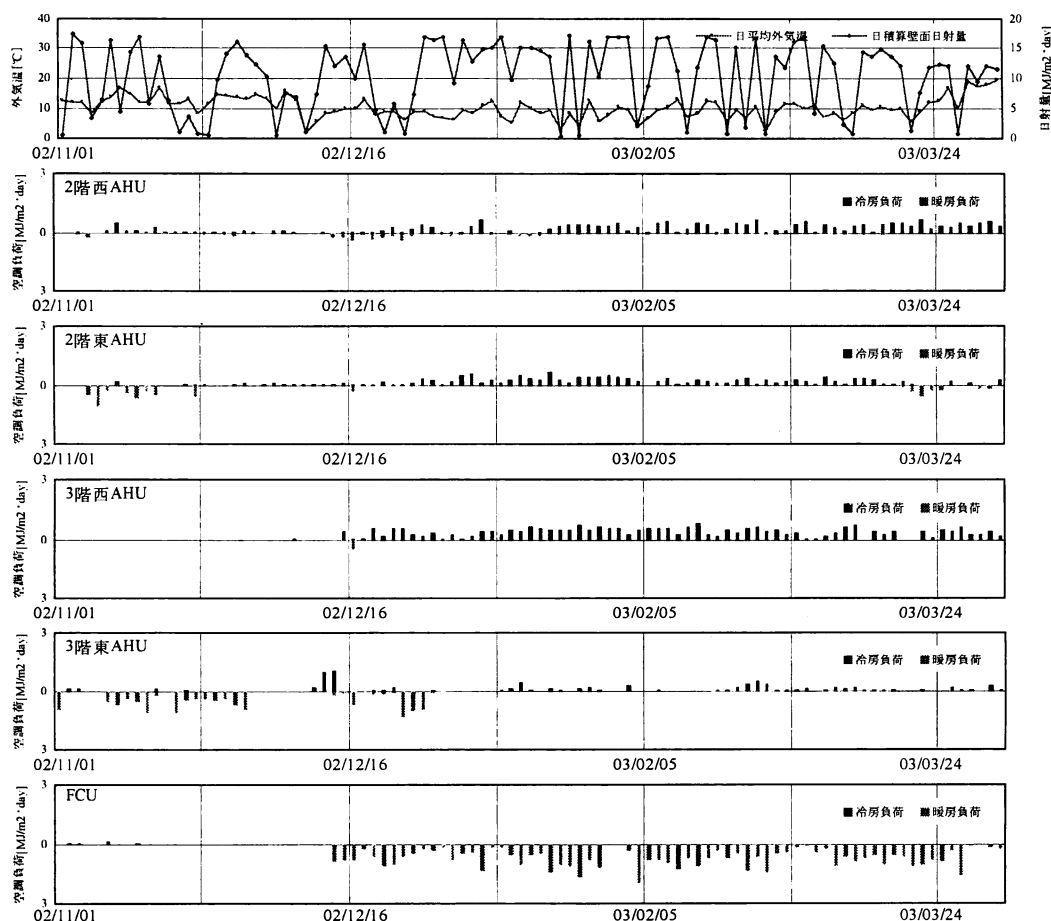


図35 日積算空調負荷と気象要因の関係（冬期）

日積算空調負荷の推移を見ると（図35）、11月の空調負荷はAHUによる暖房運転が大部分であり、冷房負荷は殆ど発生していない。この点から、11月は外気温の低下と室内の内部発熱分が相殺した期間であることが分かる。しかし12月になると外気温がさらに低下し、窓際のFCUで暖房出力が多くなる。またそれに伴いAHUでの暖房運転が殆ど見られなくなり、それに代わりAHUでは冷房運転が主体となる。11月の結果を加味して考えると、FCUの出力（暖房）が外気温低下に伴い過剰となり、室内側AHUの暖房出力分を補うに留まらず、過度の室温上昇を招き冷房負荷を発生させ、

これによる冷暖の混合損失（ミキシングロス）が発生したと推測される。図35からも、暖房出力が大きい日は概ね冷房負荷も大きく、その増減にはほぼ一致した傾向が見て取れる。これはFCUの制御方法にその一因があるといえる。

以上、冬期においては暖房運転についてハード、ソフト共に課題が残る結果となったが、冷房負荷に関しては他の期間と同様、日射の入射による負荷増大の傾向は見られず、外皮計画の有効性は十分に伺える結果であったといえる。

③照明電力消費実態

本項では本建物で導入した昼光利用、照明制御などの効果を把握するために、建物全体と計測対象室の年間と月別の照明電力消費の実態について検討を行った。

ア．建物全体における検討

平日、勤務時間帯（9:00～18:00）の居室部分における照明電力出力率と壁面日射量との関係を以下に示す。出力率については、より実態に近い考察を目的とし、昼光の得られない夜間に照明を点灯した場合の消費電力量を定格出力（100%）とした。

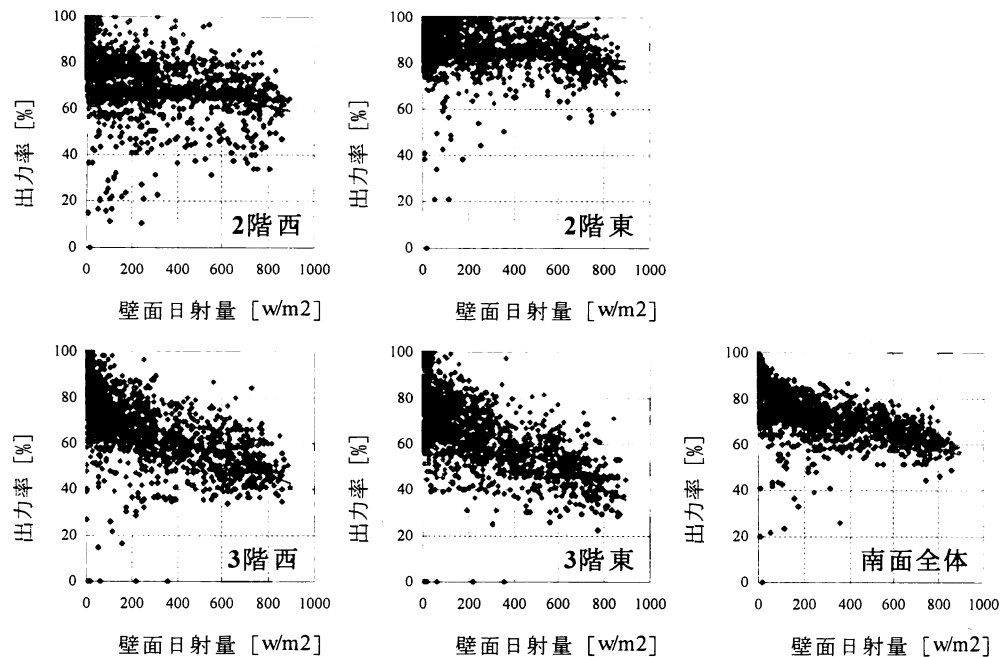


図36 照明電力出力率と壁面日射量との関係

図36より、いずれの階、ウィングにおいても壁面日射量の増加に伴い出力率は概ね低下している。前項（（3）②）にて冷房負荷と壁面日射量の間には年間を通じて相関が認められなかったことを考慮すると、本外皮計画により、日射による熱流入を抑制しつつも、自然光は有効利用出来ていたことがうかがえる。すなわち、太陽高度の高い期間においては、深い庇による直達日射の遮蔽と天空拡散光の取り込み、太陽高度の低い期間においては、TTガラス及び遮蔽型Low-Eガラスによる熱流入の抑制と、TTガラスによりほぼ完全拡散となった可視光の有効利用がなされていたと考えられる。また、3階は2階に比べ出力率が低くなる傾向にある。この点については、3階バルコニー面における高アルベド化による効果と考えることも出来るが、敷地内の樹木等の影響が階毎に異なるなど、他の要因も考えられる。

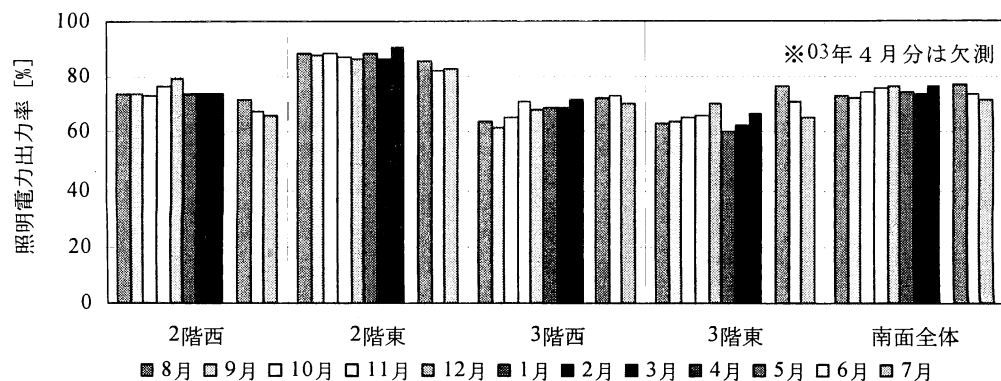


図37 照明電力出力率（月別）

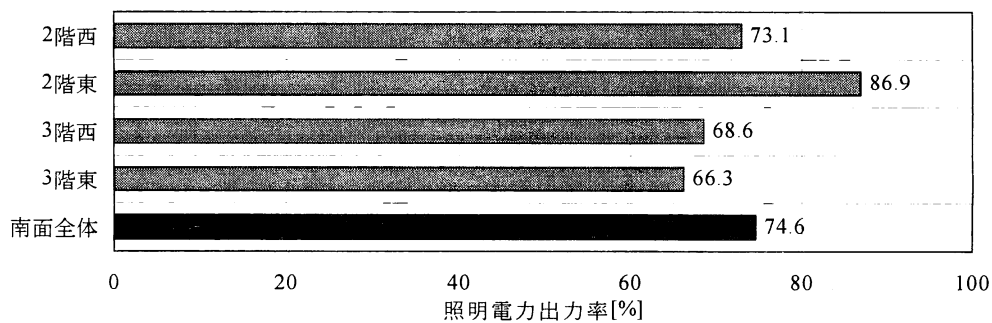


図38 照明電力出力率（年間）

月毎の出力率（図38）を見ても、年間を通じて比較的大きな削減率が得られており、期間全体では（図38）南面全体で約25%の削減率が得られた。

イ．代表室における検討

3階東ウィングの炭素吸収量解析室においては、各系統の電力量を個別に計測している（図39）。ここでは同室のデータを用い、より詳細な検討を行う。

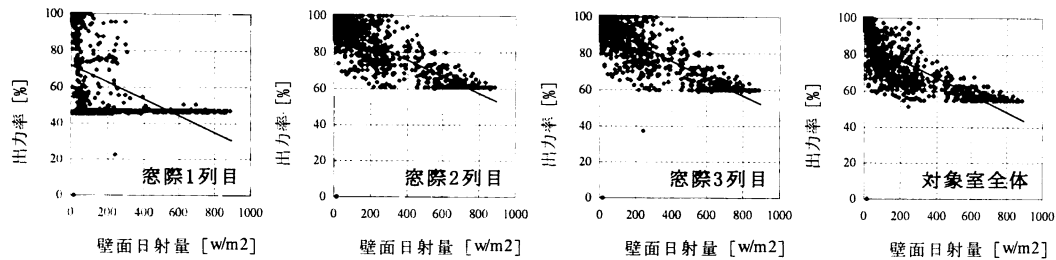


図39 照明電力出力率と壁面日射量との関係

代表室における計測結果から、窓際一列目の出力率が突出して低くなる傾向にあり、自然光利用は窓際において特に有効であるが、窓際2列目及び窓際3列目についても比較的大きな削減効果が得られている。これは本建物の居室部分が、室奥まで7m程度という計画であり、比較的昼光を獲得し易い状況にあることによる。窓際2列目と3列目については、同一の照度センサーを用い出力率を制御しているため、執務者により消灯される場合を除き両者の出力率に差はない。出力下限値は設定されていないが、窓際一列目は40%、二列目、三列目は60%以下の出力値の低下が見られず、これはハード面に由来するものであると思われる。先述の建物全体での結果では40%以下のサンプルも多く、これらは執務者により消灯されている時間帯のものと思われる。

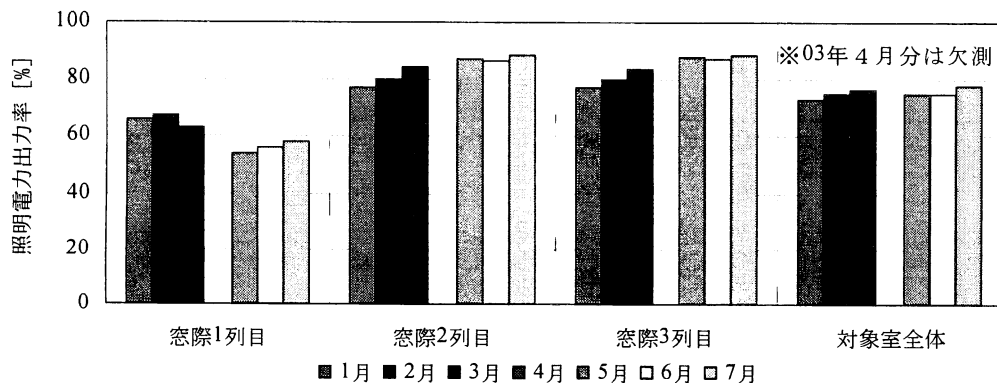


図40 照明電力出力率（月別）

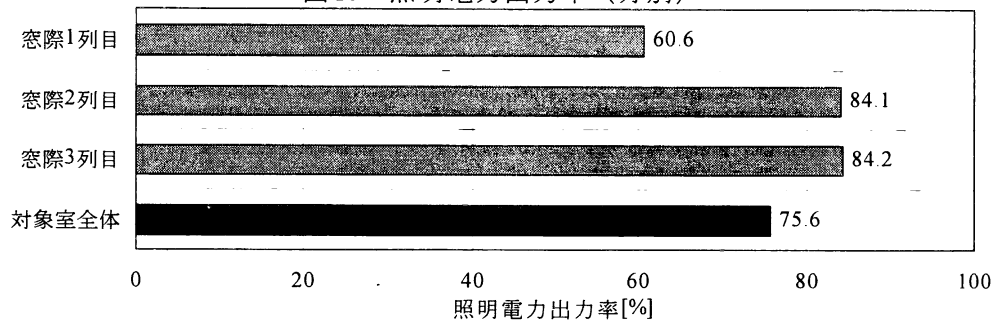


図41 照明電力出力率（年間）

ここで、南面の壁面日射量は概ね冬期に大きく、夏期に小さいという条件にありながら、各期間の出力率に大差が無いことについては、出力率の頻度分布からその要因が把握できる。図42に、代表室各系列における頻度分布を示す。サンプルの総数が月毎に異なるのは、検討対象外である休日のデータ及び欠測データの数が月毎に異なるためである。窓際一列目を見ると、出力率の高いサンプル（90%～100%）の割合は冬期に大きく、夏期に小さい。これは冬期の日照時間が夏期に比べ短く、日没後の昼光が得られない時間帯のサンプルが含まれるのに対し、夏期は壁面日射量が小さいとはいえ日照時間は長く、より多くの天空拡散光を獲得出来ることが要因と考えられる。しかし、天空拡散光の寄与度が小さい二列目及び三列目では一列目と異なり、出力率90%～100%のサンプルの割合は概ね冬期に低く、夏期に高い。室内側では天空拡散光の寄与度が小さいことで壁面日射量の変動が直に照明電力消費量に反映される。冬期は日没後のサンプルが平均値を引き上げるとはいえ、日中の壁面日射量の大きさによる効果は大きく、夏期は日照時間こそ長いものの壁面日射量が小さいことで出力率が高くなる傾向にある。これら各系列の傾向が相殺し、対象室全体でみると、月毎の出力率の差は小さくなる。

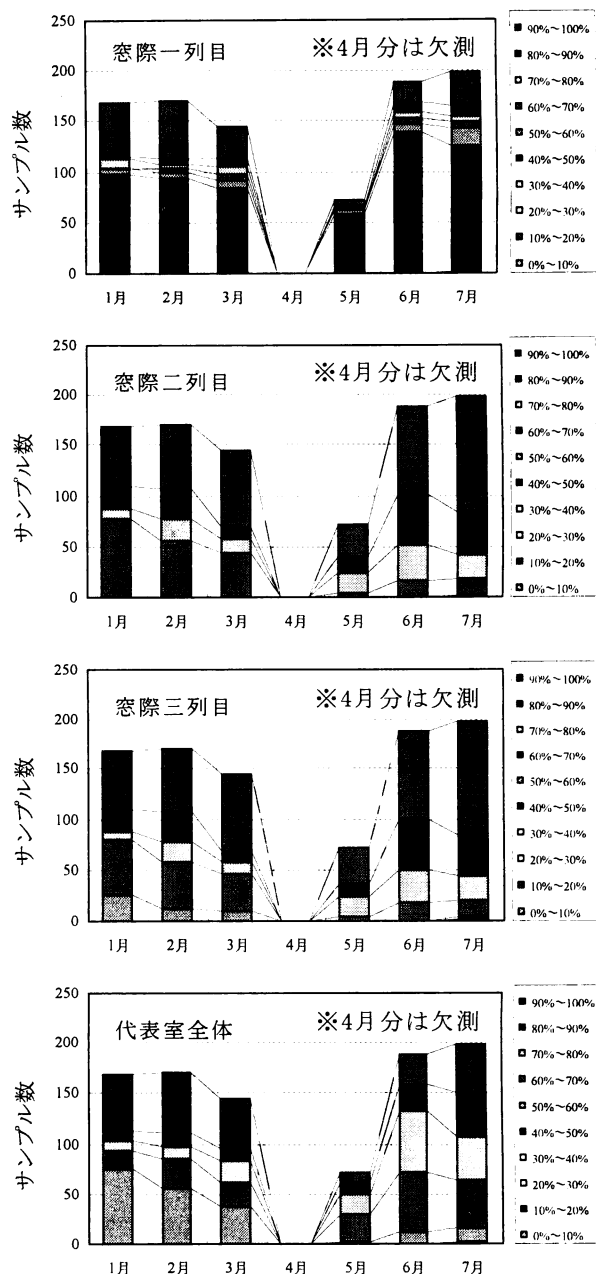


図42 出力率の頻度分布

4. セダムを用いた屋上緑化において植栽密度及び灌水の有無が屋上の熱環境に与える影響

(1) はじめに

特に夏季に問題とされる都市の熱環境の悪化は、都市域での人工構造物の増加や人工排熱の増加が主な原因とされている。そのような都市の熱環境改善策として屋上緑化への期待が高まっている。既往研究では屋上緑化による屋上の表面温度、最上階の天井面温度の低下効果が示され⁵⁾~⁶⁾、季節による植物の生育変化⁷⁾や土壌の厚さ⁸⁾、基盤の種類の違い⁹⁾による熱負荷緩和効果の比較がなされている。しかし、植物の被覆度と熱負荷低減効果の関係についての定量的な把握は未だに不十分である。また、蒸発散量に対しては灌水の有無が大きな影響を及ぼすと考えられるが、昨今は省管理型の屋上緑化が志向されていることから、できるだけ灌水の手間を省くような屋上緑化が計画されることが多い。しかし、灌水の有無と熱負荷緩和効果の関係についても既往研究においては明らかにされていない。さらに、異なる植生被覆・灌水条件下における熱負荷低減効果の差異について、その原因を熱収支・蒸発散量を含む水収支の直接測定によって考察した例はまれである。

一方、地球温暖化研究棟屋上におけるセダムを植栽した屋上緑化面における放射収支、地中温度及びヒートフラックスの長期モニタリングもこのような問題意識のもとに進められるものであるが、一義的には屋上の景観形成の視点からの設計が行われているため、様々な条件を設定しての比較実験を進めるフィールドとしては適切でない部分もある。

そこで本研究では、地球温暖化研究棟屋上における当該モニタリングと並行して、植物の量及び灌水の有無が熱負荷低減効果に与える影響をミクロに把握することを目的とし、東京大学農学部キャンパス屋上の専用実験施設をフィールドとして、土壌マットに占める植物の面積割合及び灌水管理方法の異なる植栽ユニットを設定し、熱特性の連続計測を行った。また、それらの影響が具体的にどのような熱収支によって生じているかを詳細に検討するため、植栽ユニットに吸収された熱の拡散プロセスを観測した。

(2) 研究手法

①実験条件と解析方法

植栽基盤として、市販の「椰子殻成形培土平板」(クレアテラ製)を用いた。当該品は椰子殻の粉末とチップを混入したレキ

状の土壌盤で、一枚あたり大きさ40cm×40cm厚さ10cmの矩形状を呈する。防根用ブルーシートの上に、当該品を縦横3枚密着させて敷き並べ、120cm×120cm厚さ10cmで1ユニットとした。各ユニットを木枠で囲い、相互に120cmの間隔をとり、計4ユニットを設置した。植物は屋上緑化に多用されるメキシコマンネングサ(*Sedum Mexicanum* Britton)を用いた。

本実験では、土壌マットに占める植物の平面上の面積割合を用いて植被率を求め、それを植栽密度の指標とした。各ユニットは以下のように設定した。

- 1) 無植栽区：植栽なし。灌水なし。
- 2) 疎植栽区：植被率30%。灌水なし。
- 3) 密植栽区：植被率80%。灌水なし。
- 4) 疎灌水区：植被率30%。毎朝約4Lの水を本ユニット全体に葉面から散布した。灌水した水は植栽ユニット内に残り、土壌マット下からの流出はほとんどなかった。

なお、灌水の有無が熱負荷緩和効果に及ぼす影響について論じる際は、2) 疎植栽区を無灌水区、4) 疎灌水区を灌水区と称することとする。

実験場所は東京都文京区にある東京大学農学部1号館（地上3階建）の屋上とし、測定期間は2002年8月26日から8月30日までとした。各植栽ユニットの中心部における鉛直断面温度（植物の表面、土壌の表面、植栽ユニット下）及び地中熱フラックス（植栽ユニット下）を5秒間隔で計測し、1時間平均値を得た。また9時、11時、13時、15時、17時に、放射温度（植物の表面、土壌の表面）を人力で測定、記録し（1巡に約5分を要した）、各植栽ユニット中心の表面から30cm上の高さにおける純放射フラックスを5秒間隔で1分間計測した。さらに、小試験体として大きさ32cm×28cm深さ10cmの無色透明のトレイ型プラスチック容器に水、疎植栽区、密植栽区を設定し、9時から17時まで1時間毎に重量変化を計測した。以上に併行して、気象条件の測定を行った。測定項目は表1に示す通りである。気温、相対湿度、風向、風速、及び全天日射フラックスは5秒間隔で計測し、1時間平均値を得た。降水量は1時間毎の積算値を得た。

なお、本研究では、各植栽ユニットの表面温度及び植栽ユニット下温度をもって、大気及び建物への熱負荷評価指標とした。各植栽ユニットの表面温度は、土壌と植物の面積割合により重みづけした下式(1)によって求めた。

$$T = V \times T_v + (1-V) \times T_s \quad (1)$$

ここで、Tは各植栽ユニット全体の表面温度（℃）、Vは1を最大値とした植物の植被率、 T_v は植物の表面温度（℃）、 T_s は土壌の表面温度（℃）である。なお、疎灌水区の表面温度は9時から17時までの2時間毎の値である。

また、小試験体の重量変化を用いて、下式(2)から潜熱フラックスを求めた。

$$LE = l \times E \times t / 3600 \quad (2)$$

ここで、 l ：水の気化熱（ $2.5 \times 10^6 - 2400 \times T$ ）（ JKg^{-1} ）、 T ：気温（K）、 E ：重量変化（ $\text{Kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ）である。

なお、純放射フラックスについては、植栽ユニットへの流入を正、流出を負とし、地中熱フラックス及び潜熱フラックスについては、植栽ユニットからの放熱を正、吸熱を負とした。

表1 測定項目

観測項目	測定機器	測定点	出力値
気温	遮光ブレード付き	屋上面から1.5 mの高さ	1時間平均値
相対湿度	温湿度計		
風速	三杯式風速計		
風向	矢羽式風向計		
全天日射フラックス	pyranometer		
降水量	転倒升型雨量計		1時間積算値
表面温度	T型熱電対	植物表面/土壌表面/植栽ユニット下	1時間平均値
地中熱フラックス	熱流板	植栽ユニット下	
放射温度	放射温度計	各植栽ユニットの土壌面9地点、植物表面9地点	各植栽ユニットの土壌面、植栽表面毎に9地点（1回測定）の平均値
純放射フラックス	純放射計	各植栽ユニット表面から30cmの高さ	1分間平均値
重量変化	電子天秤	32cm×28cm×10cmの容器に入れた水/疎植栽区/密植栽区	1時間毎の測定値

②気象条件

2002年8月は18日と19日、及び23日と24日に合計それぞれ63.6mm、15.4mmの降水があった。実験期間中である8月26日から30日までの気象条件として、平均気温と平均湿度の経時変化を図1に、

風向と風速の経時変化を図2に示す。8月26日から8月30日にかけて気温は上昇傾向にあり、日平均気温は26℃から29℃の範囲にあったのに対して、相対湿度は減少傾向にあり、日平均湿度は66%から74%の範囲にあった。風速は各日とも日中に強く、夜間に弱くなる日変化を明瞭に示した。風向は、東から南よりの風が卓越していた。

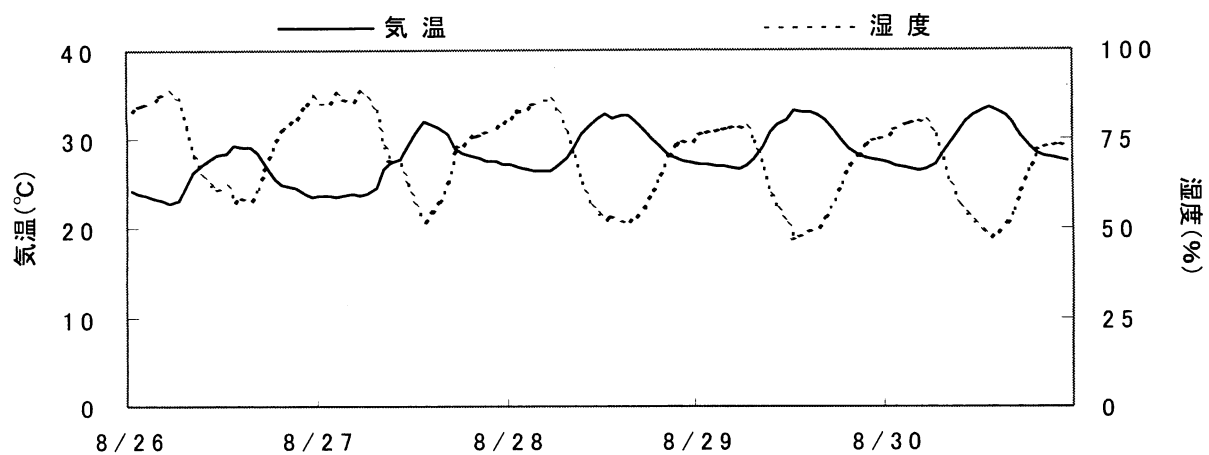


図 1 平均気温と平均湿度の経時変化

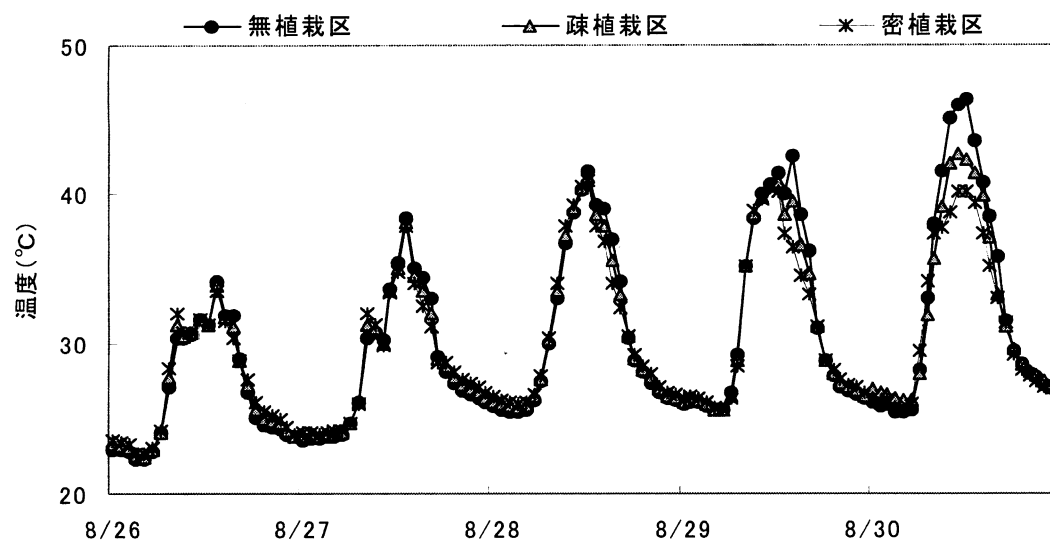


図 2 平均風速と平均風向の経時変化

(3) 結果と考察

①温度特性

ア. 表面温度

(ア) 植栽密度の違いによる比較

植栽密度の異なる各プロットにおける表面温度 T_s の経時変化を図3に示す。日中では、降水直後は温度が低く植栽密度による温度差も小さかったが、無降水期間の長期化に伴い温度が高くなり、それに伴って植栽密度の増加に伴う温度上昇の抑制がみられた。日最高温度は降水直後であった8月26日では無植栽区 (34.2°C) に比べ、疎植栽区で 0.3°C 、密植栽区で 0.7°C 低かった。一方、無降水日が続いた後の8月30日では無植栽区 (46.3°C) に比べ、疎植栽区で 3.7°C 、密植栽区で 6.2°C 低かった。日没から明け方にかけては、植栽密度による温度差が日中より小さくなり、日最低温度では植栽密度による温度差がほとんどなかった。

一般に土壌面は植物よりも高温になりやすい。本実験では、植栽密度の増加に伴い緑陰効果によって土壌面への日射量が減じ、表面温度の上昇が抑えられたと考えられる。つまり、植栽ユニットの表面温度について、植被率と温度上昇抑制効果は概ね比例関係にあると言える。

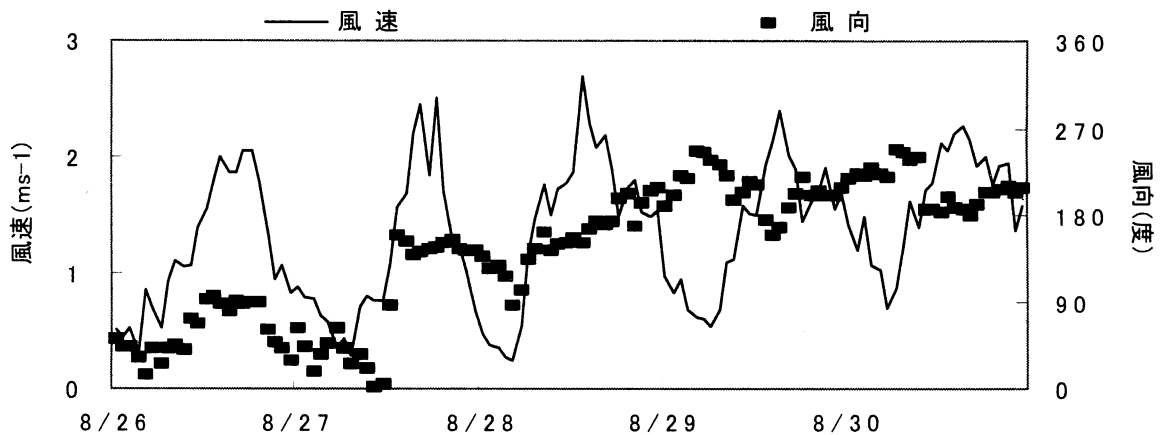


図3 表面温度 T_s の経時変化 —植栽密度の違いによる比較—

(イ) 水の有無による比較

灌水の有無による T_s の経時変化を図4に示す。降水直後は両実験区共に温度が低く灌水の有無による温度差が小さかったが、無降水期間の長期化に伴い、温度が高くなるとともに灌水区の温度上昇の抑制がみられ、灌水の有無による温度差が大きくなった。日最高温度は、降水直後であった8月26日では無灌水区 (33.8°C) に比べ、灌水区で 0.6°C 低かった。一方、無降水日が続いた後の8月30日では無灌水区 (42.3°C) に比べ、灌水区で 2.4°C 低かった。降水直後は、両実験区共に湿潤な状態にあったため、灌水効果による温度差が小さかったが、無降水期間の長期化に伴い、無灌水区では土壌マット表面が乾燥したため灌水効果による温度差が大きくなったと考えられる。

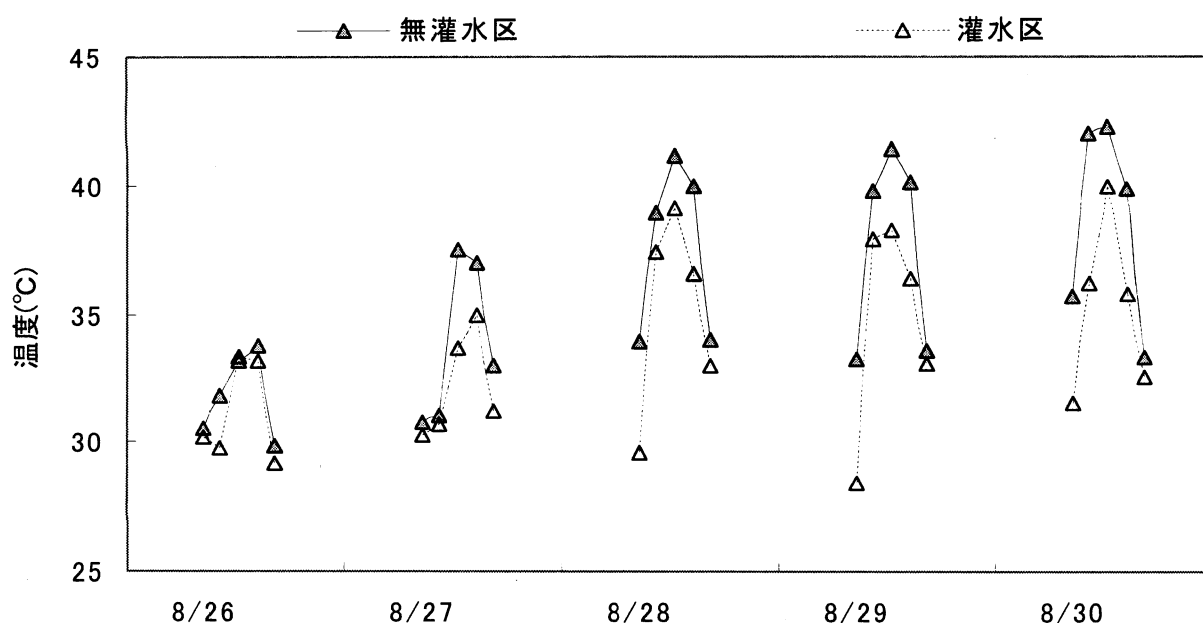


図 4 表面温度 T_s の経時変化 (9 時、11 時、13 時、15 時、17 時の温度)
— 灌水の有無による比較 —

イ. 植栽ユニット下温度

(ア) 植栽密度の違いによる比較

植栽密度の異なる各プロットにおける植栽ユニット下温度 T_u の経時変化を図5に示す。日中では、降水直後は温度が低く植栽密度による温度差はほとんどなかったが、無降水期間の長期化に伴い、温度が高くなり、それに伴って植栽密度の増加に伴う温度上昇の抑制がみられた。日最高温度は降水直後であった8月26日では無植栽区 (29.4℃) に比べ、疎植栽区・密植栽区ともに0.3℃低かった。無降水日が続いた後の8月30日では無植栽区 (33.4℃) に比べ、疎植栽区で0.3℃、密植栽区で0.7℃低かった。表面温度に比べ、植栽密度による日中の温度差が小さいことから、植栽ユニット下温度への植栽密度による影響は比較的小さいと考えられる。同様に、日没から明け方にかけては植栽密度による温度差は小さかったが、その一方で日最低温度は植栽密度の増加に伴い高くなった。これは植栽密度の増加に伴い、放射冷却効果が抑制されたためと考えられる。

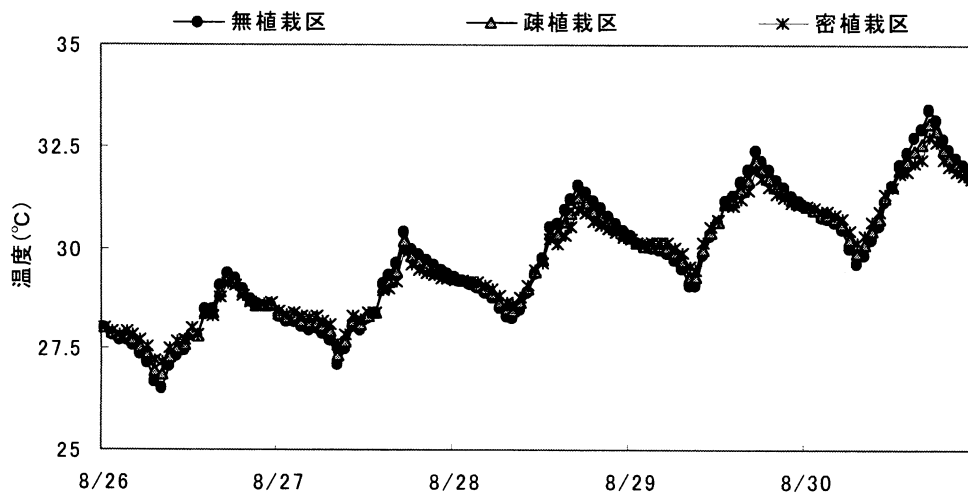


図 5 植栽ユニット下温度 T_u の経時変化 — 植栽密度の違いによる比較 —

(イ) 灌水の有無による比較

灌水の有無による T_u の経時変化を図6に示す。日中では、降水直後は両実験区共に温度が低く灌水の有無による温度差が小さかったが、無降水期間の長期化に伴い、温度が高くなるとともに灌水区の温度上昇の抑制がみられ、灌水の有無による温度差が大きくなった。日最高温度は降水直後であった8月26日では無灌水区 (29.1°C) に比べ、灌水区で0.2°C低かった。一方、無降水日が続いた後の8月30日では無灌水区 (33.1°C) に比べ、灌水区で0.6°C低かった。日没から明け方にかけては、植栽密度による温度差が小さくなり、日最低温度は灌水の有無による温度差がほとんどなかった。降水直後であった8月26日は、両実験区共に湿潤な状態にあったため、灌水効果による温度差が小さくなったが、無降水期間の長期化に伴い、無灌水区では土壌マットが乾燥したため灌水効果による温度差が大きくなったと考えられる。

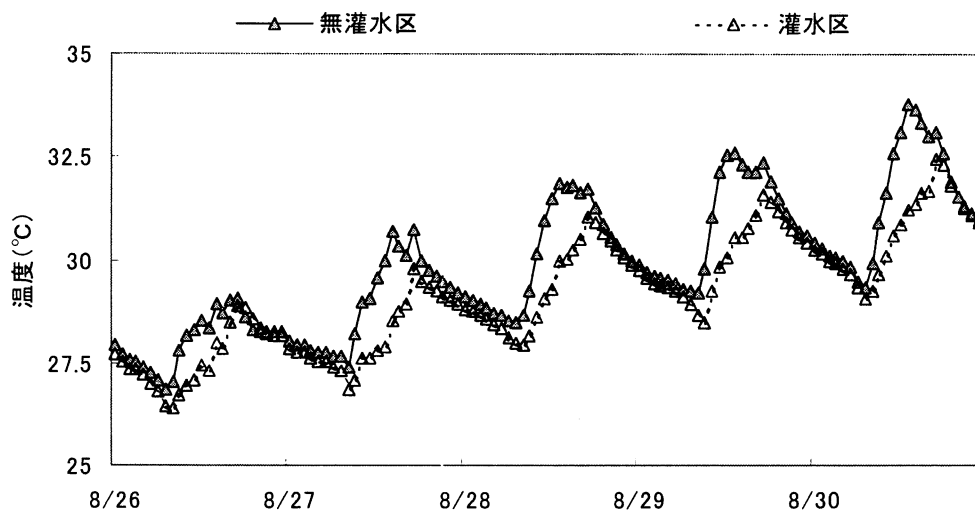


図 6 植栽ユニット下 T_u 温度の経時変化 — 灌水の有無による比較 —

②熱の拡散プロセス

ア. 重量変化

水・疎植栽区・密植栽区の各小試験体について、各日の9時から翌日9時までの重量減少量と日積算全天日射量を図7に示す。水の重量減少量は、日積算全天日射量の増減に伴い変化したのに対して、疎植栽区及び密植栽区のそれらは一貫して減少傾向にあった。疎植栽区では減少量は降水直後であった8月26日において水の3分の2程度であり、以降一貫して減少し、無降水日が続いた後の8月30日には水の5分の1程度であった。一方、密植栽区では8月26日及び8月27日では水と同程度の減少量があったが、8月28日以降は水の減少量の半分以上になり、8月29日には疎植栽区と同程度になった。ここで、土壌マット下からの水の流出や風による土の飛散がなかったことから、重量減少分は小試験体からの蒸発散量と考えることができる。そこで、この重量減少分から各日の潜熱フラックスの平均値を(2)式で見積もったところ、8月26日では水 239.1Wm^{-2} に対して、疎植栽区で 149.1Wm^{-2} 、密植栽区で 216.4Wm^{-2} であった。一方、無降水日が続いた8月30日では、水 455.2Wm^{-2} に対して、疎植栽区で 66.8Wm^{-2} 、密植栽区で 75.1Wm^{-2} であった。

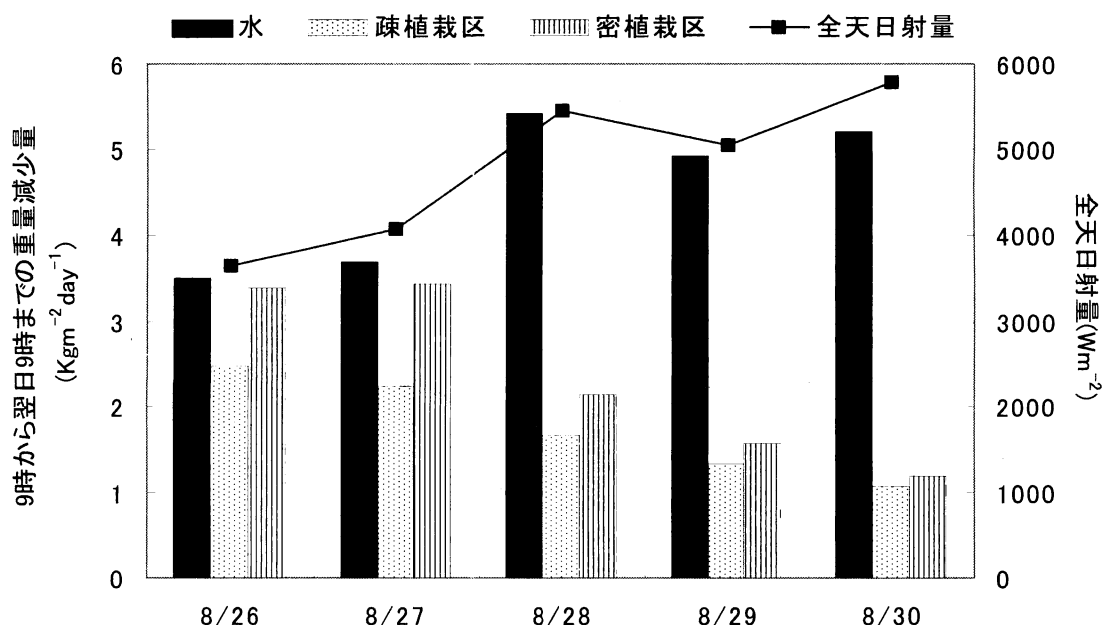


図 7 小試験体の重量減少量と日積算全天日射量の経日変化

ここで、植栽ユニットに入射する純放射フラックスの各日の平均値及びそれに対する潜熱フラックスの割合を検討した。8月26日では、純放射フラックスは疎植栽区で 292.6Wm^{-2} 、密植栽区で 320.0Wm^{-2} であり、これに対する潜熱フラックスの割合は疎植栽区50%、密植栽区67%であった。従って、降水直後では蒸発散量が大きかったため純放射エネルギーの半分以上が潜熱として発散されたこと及びその割合は植栽密度の増加に伴い大きくなったことが考えられる。一方、無降水日が続いた後の8月30日では、純放射フラックスは疎植栽区で 370.0Wm^{-2} 、密植栽区で 302.4Wm^{-2} であり、これに対する潜熱フラックスの割合は疎植栽区18%、密植栽区25%であった。従って、無降水日が続く蒸発散量が減少したため、純放射エネルギーの約2割のみが潜熱として発散されたこと、及び植栽密度の違いによる割合の差が小さくなったことが考えられる。

イ. 地中熱フラックス

植栽密度の異なる各プロットにおける地中熱フラックスと全天日射フラックスの経時変化の違いを図8に示す。日の出から日没にかけては、主に日射による入射エネルギーが大きく植栽ユニットから建物への流出の方が大きいため正の値となり、日没から明け方にかけては、日射がなく主に建物に日中蓄熱された熱の植栽ユニットへ流入の方が大きいため負の値となった。また、各日の全天日射フラックスと関連した変動がみられ、日中では、全天日射フラックスが小さい日は植栽密度による地中熱フラックスの差は小さかったが、全天日射フラックスが大きい日はその差が大きかった。全天日射フラックスが大きい日は、無植栽区及び疎植栽区では各日の全天日射フラックスの増減によって変化し、建物への熱流出値が同程度に大きかったが、密植栽区では全天日射フラックスの増減による変化は相対的に小さく、低い値で安定していた。地中熱フラックスの日最大流出値は、日積算全天日射量が最も小さかった8月26日では、無植栽区 (71.5Wm^{-2}) に比べ、疎植栽区で 18.9Wm^{-2} 、密植栽区で 46.8Wm^{-2} 小さかった。日積算全天日射量が最も大きかった8月30日では無植栽区 (190.6Wm^{-2}) に比べ、疎植栽区で 0.1Wm^{-2} 、密植栽区で 111.5Wm^{-2} 小さかった。日没から明け方にかけては、無植栽区及び疎植栽区では植栽ユニットへの流入値が同程度に大きかったのに対し、密植栽区では相対的に小さかった。

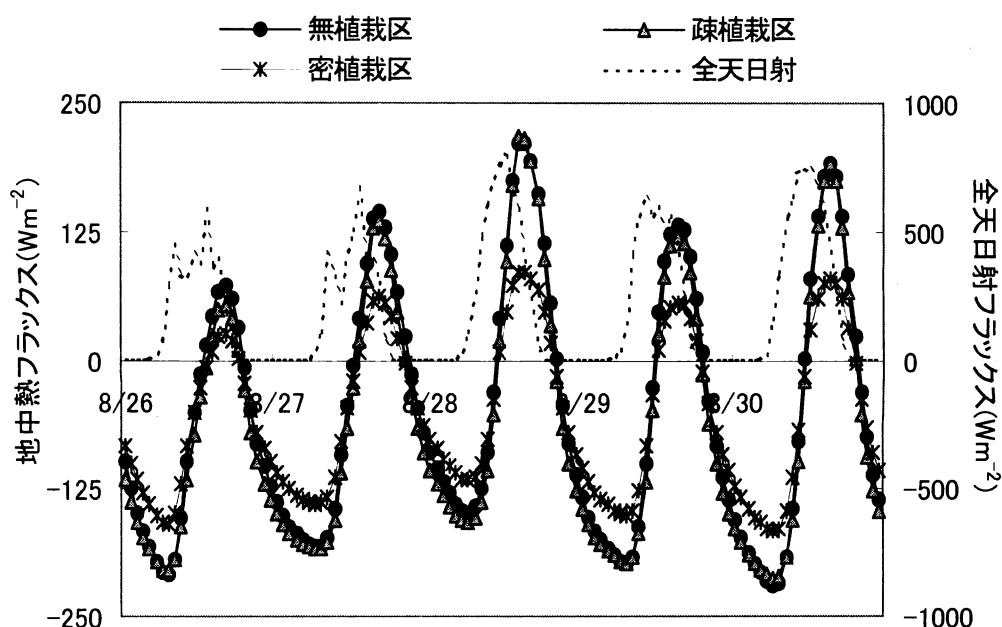


図 8 地中熱フラックスと全天日射フラックスの経時変化 — 植栽密度の違いによる比較 —

ここで、植栽ユニットに入射する各日の純放射フラックスの平均値に対する地中熱フラックスの割合を検討した。降水直後であった8月26日は、地中熱フラックスは無植栽区 -51.7Wm^{-2} 、疎植栽区 -42.4Wm^{-2} 、密植栽区 -35.2Wm^{-2} であり、純放射フラックスに対する割合は無植栽区 -18% 、疎植栽区 -15% 、密植栽区 -12% であった。これにより、植栽ユニット全体の温度が低く全天日射フラックスが小さい条件下においては、日射による建物への熱流出値に比べ植栽ユニットへの熱流入値の方が大きくなったこと、及び植栽密度の増加に伴い蒸発散量が大きくなったため純放射フラックスに対する地中熱フラックスの割合は植栽密度の増加に伴い小さくなったと考えられる。一方、

無降水日が続いた後の8月30日は、地中熱フラックスは無植栽区 39.0Wm^{-2} 、疎植栽区 29.6Wm^{-2} 、密植栽区 -3.5Wm^{-2} であり、純放射フラックスに対する割合は無植栽区10%、疎植栽区8%、密植栽区-1%であった。これから、無降水期間の長期化に伴い土壌マット表面が乾燥した状態では蒸発散量が減少し、植栽ユニット全体の温度が高く全天日射フラックスが大きかったため、日射による建物への熱流出値が大きくなったことが考えられる。

5. セダムを植栽した屋上緑化面における長期モニタリング

(1) 研究手法

①研究実施場所

研究実施場所は独立行政法人国立環境研究所地球温暖化研究棟(茨城県つくば市小野川16-2 ; 北緯36° 02' 53"、東経140° 07' 27")の緑化された屋上面で、建物外観は図1に示すとおりである。地球温暖化研究棟は国土交通省官庁営繕部の策定した「グリーン庁舎計画指針」に基づく様々な環境保全手法がとりいれられたコンクリートRC造3階建ての建物である。建物はほぼ東西方向に建設されており、東側及び西側ウィングを中央のアトリウムで接続したデザインとなっている。屋根上にソーラーパネルを設置した東側ウィングは真南に面し、セダムマットで屋上全面に植栽された西側ウィングは南南東に面している。外観上特徴的な屋根面は南側に25度の傾斜角度がついており、南東から南西方向の風が吹送した際に風下側に発生する負圧を利用した建物内への導風を考慮した設計がなされている。

観測機器は図2に示すように屋上緑化面上に三脚を使用して固定設置した。

地球温暖化研究棟の屋上緑化面では、2002年9月の観測当初より2003年5月末まで傾斜部分に植栽したセダムの養生のために自動灌漑装置による灌水を実施した。2003年6月以降観測終了時期の2004年1月までは灌水の有無による影響を観測するためこれを停止した。灌水時間は暖候期(4月から10月まで)には週3回夜8時から、寒候期(11月から3月まで)には週2回朝10時からそれぞれ10分間であった。なお、センサー設置場所への灌水の影響はなく、センサーが直接水に濡れることはなかった。観測場所は建物屋上で南面に面しており周囲に遮蔽物などはなく、日の出から日の入りまで十分な日射量がある。この屋上緑化システムでは本来セダム類が植栽されていたが、その後イネ科の植物が飛来して自生している。

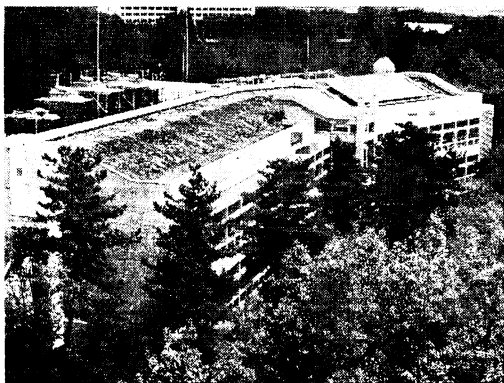


図 1 地球温暖化研究棟(2003年4月撮影)

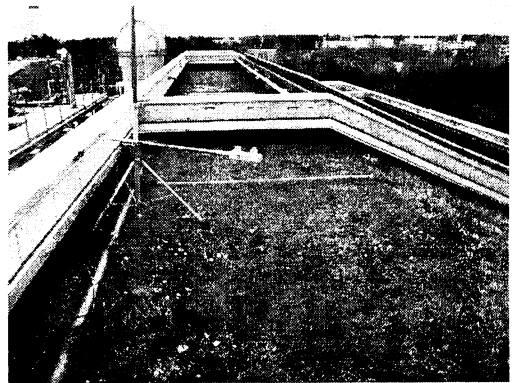


図 2 観測機器設置状況(左手前は灌漑パイプ)

②地球温暖化研究棟で採用している屋上緑化システム

地球温暖化研究棟で採用している屋上緑化システムは(株)ドコーのグリーンボールであり、2002年の地球温暖化研究棟竣工後に屋上緑化工事を施工した。

この屋上緑化システムの特徴として、使用するセダムマットの厚さが50mm程度と薄く土砂が少ないため湿潤時であっても50kg/m²と軽いこと(図3、図4)、また比較的乾燥に強い種類のセダムを使用しているため灌水のための手間とコストが低減されることがあげられる。

本来植栽されているのはアルBUM(*Sedum Album*)、サカサマンネングサ(*Sedum Reflexum*)、キリ

ンソウ (*Sedum Kamtschatium*)、メキシコマンネングサ (*Sedum Mexicanum*)、タイトゴメ (*Sedum Orzyiholium Makino*)、マルバマンネングサ (*Sedum Makinoi*) の6種類であるが、その他に現在はツルマンネングサ (*Sedum Sarmentosum*) も夏期に繁茂している。夏期には飛来してきたイネ科の一年草(いわゆるエノコロ草等)も自生している。冬期にはサカサマンネングサ、キリンソウ、マルバマンネングサなどは常緑のため残るが、夏期にもっとも多勢のツルマンネングサは枯死する。

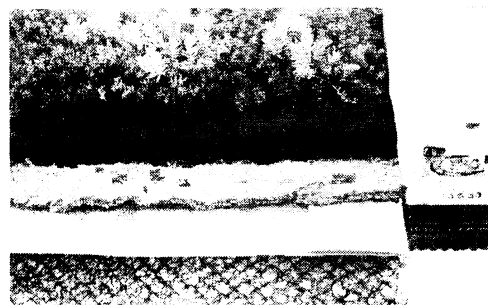
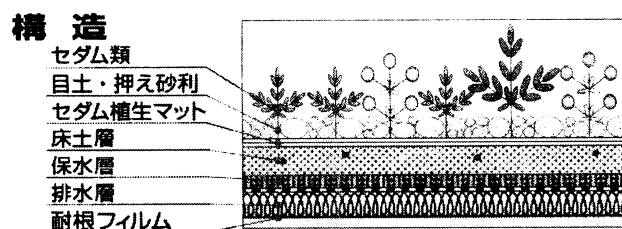


図 3 セダムマット断面図(商品パンフレットより)

図 4 セダムマット断面写真

③観測に使用した機器

今回の観測に使用した機器は、Kipp&Zonen社製放射収支計 CNR-1を放射収支観測のために、ブリード社製熱電対を地中温度観測のために、Hukseflux社製熱流計UT03および2003年8月以降の追加実験で使用したREBS社製熱流計PHF-01を地中熱貫流の観測のために使用した。観測データはLSI社製データロガーBABUC abc(20ch用)を用いて毎時刻の1時間平均値を自動記録した。また、観測実施場所でのローカルな気象条件を観測するために、2003年7月に米国DAVIS社製の気象ロボット(Vantage Pro Wireless model)を設置して観測終了時まで気象観測を行った。

④観測項目及び設置場所

観測項目は表1にまとめられたとおりである。放射収支観測は、放射収支計CNR-1をセダムを植栽した平坦上に設置し短波長下向き放射(全天日射Sd)、短波長上向き放射(地表面反射日射Su)、長波長下向き放射(大気放射Ld)、長波長上向き放射(地表放射Lu)をそれぞれ個別に観測し、それら個別データからアルベド α (短波長下向きに対する短波長上向きの百分率)および正味放射収支量(Rnet)を求めた。地中温度の計測には熱電対を使用し、植栽の有無、斜面か平坦面かの条件を考慮して表1の5地点で計測した。熱貫流(Heat Flux: ヒートフラックス)は植栽の有無を考慮し、平坦面上の2地点に熱流計を設置して観測した。図5に主な観測機器の設置状況を示す。

2003年7月より開始した気象観測は、観測実施場所のローカルな気象条件を把握することが目的であり、気温、湿度、風向・風速、日射量、雨量、気圧の気象7要素及び地温、土壌水分量を観測した。

表 1 観測に使用した機器と設置場所

機器名	観測項目およびセンサー名称	測定単位	設置場所
CNR-1	短波長下向き(全天日射)	W/m ²	セダム植栽地(T1直上)
CNR-1	長波長下向き(大気放射)	W/m ²	同上
CNR-1	短波長上向き(地表面反射日射)	W/m ²	同上
CNR-1	長波長上向き(地表放射)	W/m ²	同上
熱電対	地中温度 T1	℃	平坦セダム植栽地(HF 1同地点)
熱電対	地中温度 T2	℃	斜面セダム植栽地
熱電対	地中温度 T3	℃	平坦セダム密植地
熱電対	地中温度 T4	℃	斜面裸地
熱電対	地中温度 T5	℃	平坦裸地(HF 2同地点)
UT03	地中熱流量 HF 1	W/m ²	セダム植栽地(T1同地点)
UT03	地中熱流量 HF 2	W/m ²	裸地 (T5同地点)

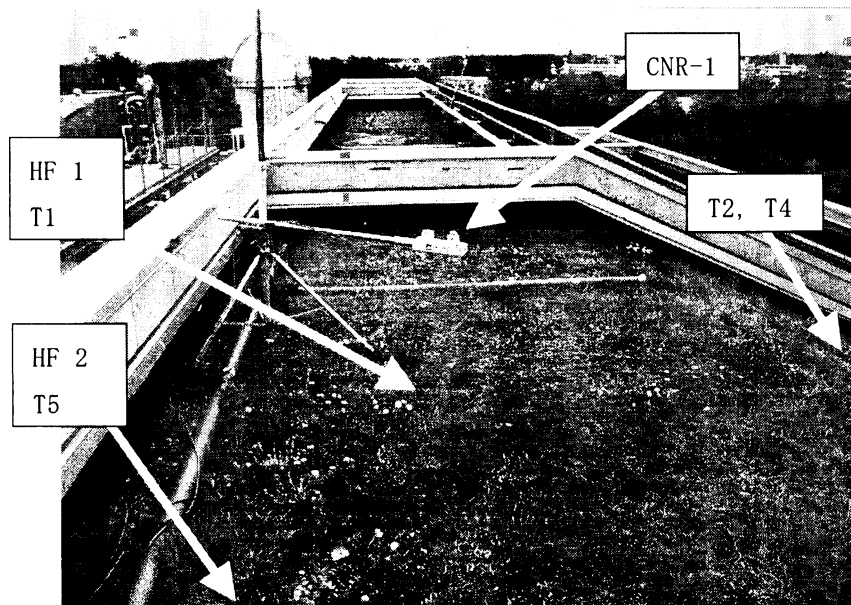


図 5 主な観測機器の設置場所

⑤観測実施期間及び分析期間

継続的な観測を2002年9月17日より開始し、2004年1月14日まで行った(表2)。通算観測日数は合計485日間である。晴天日の抽出は観測全期間に渡って降雨データを使用可能なアメダスつくばのデータから、1mm以上の雨量を観測した日を雨天日、1日の日照時間5時間未満を曇天日として除去し、晴天日を抽出した。2003年6月、7月、8月および11月は天候が不順であり、晴天日数は他の月と比べて少なくなった。

データの欠測が発生したのは、2002年10月18日および12月18日に草刈のため、2002年12月27日、2003年1月10日、31日にはセンサーメンテナンスのため、2003年8月11日にはセンサー入れ替えに

伴う観測項目変更作業のため、2003年10月17日～20日はデータロガー装置不調のためで、それぞれ作業実施中は観測を停止している。なお地中温度T3(セダム密植地に設置した)は2月26日から3月28日の期間に関してセンサーの接点不良と思われる異常データが記録されたため、以後のデータの信頼性が低いため当該期間以降を分析から除外した。

観測を開始した2002年9月から2003年5月までは自動灌漑装置による灌水を実施していたが、5月末で灌水を停止したため2003年6月以降は天水のみで定期的な灌漑は実施していない。その結果として、2003年のセダムの生育状況に変化はないが雑草の繁茂が2002年よりは抑えられている(図6)。

表 2 観測期間及び晴天日数

月	日数	晴天日数	晴天日数 比率(%)	通算観 測日数	通算晴 天日数	備考
2002年9月	14	7	50	14	7	17日から開始
10月	31	15	48	45	22	18日センサー周辺の小規模な草刈
11月	30	16	53	75	38	
12月	31	14	45	106	52	18日草刈 27日センサーメンテナンス
2003年1月	31	22	71	137	74	10日、31日センサーメンテナンス
2月	28	15	54	165	89	2/26から3/28まで T3データ不良
3月	31	19	61	196	108	
4月	30	11	37	226	119	
5月	31	14	45	257	133	
6月	30	9	30	287	142	天候不順のため晴天日少ない
7月	31	4	13	318	146	天候不順のため晴天日少ない
8月	31	10	32	349	156	11日熱流計増設
9月	30	19	63	379	175	
10月	31	15	48	410	190	
11月	30	7	23	440	197	天候不順のため晴天日少ない
12月	31	20	65	471	217	
2004年1月	14	13	93	485	230	14日観測終了、観測機器撤去

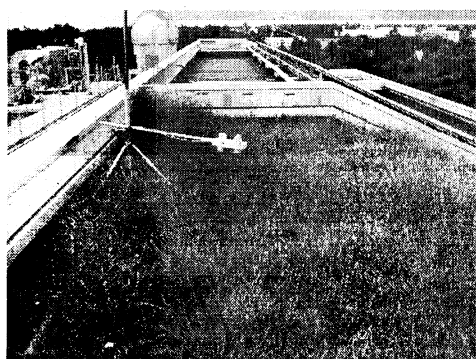


図 6 灌水の有無によるセダムの生育状況の違い(左:2002年10月2日、右:2003年9月4日)

(2) 観測結果

①放射収支観測

ア. 年間観測結果および月平均分析

アルベド及び正味放射収支量は以下の式によって計算される。

$$\text{アルベド： } \alpha (\%) = S_u / S_d \times 100 \quad \text{——— (1)}$$

$$\text{正味放射収支量： } R_{\text{net}} (\text{W/m}^2) = S_d + L_d - (S_u + L_u) \quad \text{——— (2)}$$

ただし、 S_d ：短波長下向き(全天日射) L_d ：長波長下向き(大気放射) S_u ：短波長上向き(地表面反射日射) L_u ：長波長上向き(地表放射)である。

図7は屋上緑化面上で観測された毎日の全天日射量(Solar Radiation)と正味放射収支量(Net Radiation)を観測全期間に渡りアイソプレス形式で表示したものである。縦軸が日付、横軸が時刻を表している(アイソプレス形式による表示の場合以下同様である)。十分な日射量がない日のデータは横方向に伸びる黒い帯で示されている。中央部分の縦方向につながる明色部分が十分な日照のある時間帯である。

全天日射量の季節変化に関しては、2002年9月、10月には日最大値が平均して700 W/m²を超え800W/m²に近い日もあった(10月2日12:00に 802.0 W/m²)。2002年11月から2003年1月の期間は平均して500 W/m²程度であり、最大でも600 W/m²程度であった。2003年2月から700 W/m²を超えるようになり、3月から6月の期間は800W/m²を超える日が多く、4月22日12:00に年間を通して最大の990.7 W/m²を記録した。2003年の7月から9月の期間は天候が不順であったため曇天、雨天が多く、晴れた日の全天日射量の日最大値は600～700W/m²前後であった。その後10月は500 W/m²前後、11月から2004年1月の期間は400 W/m²前後であった。2年分の観測データのある10月以降1月までを前年同時期と比較すると200 W/m²程度少ない結果となった。

正味放射収支量の日変化は日中は正の数値、日没後は負の数値でその状態は翌朝まで継続される。

正味放射収支量の季節変化をみると、日中の正味放射収支量は2002年9月、10月には400～500 W/m²程度、11月から2003年1月の期間は300 W/m²前後にまで低下するが、2月以降400 W/m²を超えるようになり、3月半ばには600 W/m²を超える。最大値は6月27日11:00に686.7 W/m²であった。天候が不順となった2003年7月以降は晴天日であっても500 W/m²程度であり、平均300～350 W/m²しかなく、これは前年の2002年11月から2003年1月の期間と同様の数値であった。2003年10月、11月は250 W/m²程度、12月、2004年1月は最大でも200 W/m²程度であった。2年分の観測データのある10月以降1月までを前年同時期と比較すると80～120 W/m²程度少ない結果となった。一方夜間の正味放射収支量は年間を通じておよそ-100～-30W/m²の範囲にあるが地中温度の高い暖候期には-50～-10 W/m²の範囲であった。

図8は全天日射量と正味放射収支量について、各月の晴天日のデータを図7と同様にアイソプレスの形式で表現したものである。日中の全天日射量の日最大値は、季節変化に伴い暖候期で750～900 W/m²前後、寒候期で500 W/m²前後であった。最大値は2003年4月13:00で909 W/m²であった。正午の最小値は2004年1月の434 W/m²であった。一方、正味放射収支量の日最大値は暖候期に550～650 W/m²で、寒候期には250～300 W/m²程度であり、暖候期の方が大きくなった。最大値は2003年6月の13:00で640 W/m²であった。日没後の正味放射収支量は、気温および地中温度が低く日中の正味放

射収支量が少ない時期でも最大で $-100 \sim -70 \text{ W/m}^2$ を記録するのに対して、気温および地中温度が高く日中の正味放射収支量の多い暖候期では最大でも $-40 \sim -20 \text{ W/m}^2$ と小さくなった。

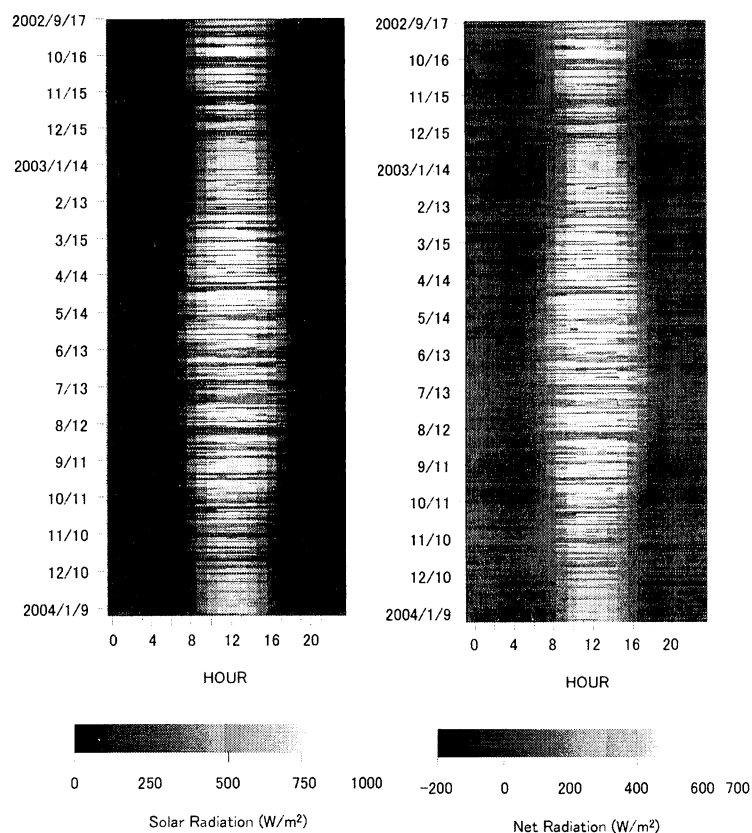


図 7 全天日射量(左)と正味放射収支量(右)のアイソプレス

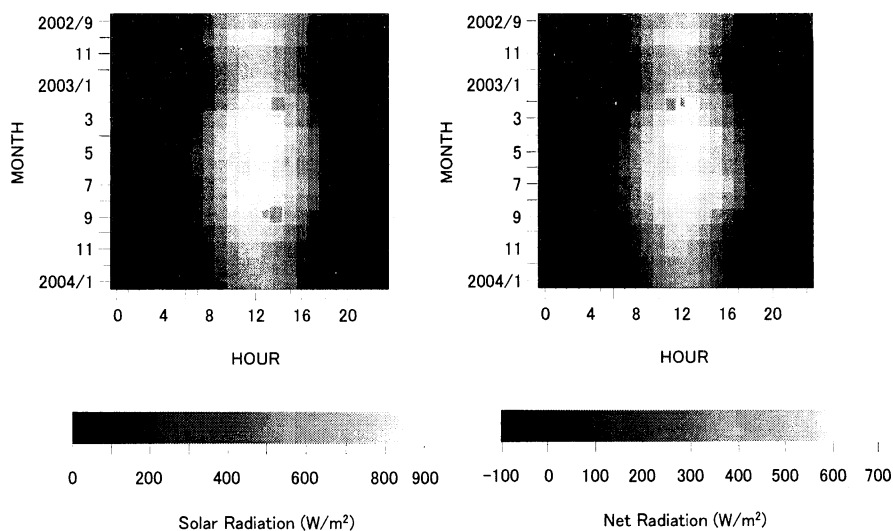


図 8 晴天日の全天日射量(左)と正味放射収支量(右)のアイソプレス

イ. アルベドの季節変化

表3は、セダム植栽地におけるアルベド(全天日射量と地表面反射日射量の比の百分率)の晴天日平均値である。正午のアルベドは季節によらずおよそ13～18%を示し太陽高度の低くなる朝夕では少々高くなり25%を超えるが、日中はおおむね15%前後であった。

表 3 セダム植栽地(平坦部分)における晴天日日中のアルベド

月\時刻	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2002年9月	22	20	19	18	18	19	19	21	23
10月	22	19	17	16	17	17	18	20	24
11月	22	18	17	16	16	17	18	19	24
12月	28	21	18	17	17	18	19	21	26
2003年1月	26	20	18	16	16	17	18	19	23
2月	22	18	16	15	15	15	16	17	19
3月	17	15	15	13	14	15	15	15	16
4月	16	15	15	14	15	15	15	16	17
5月	18	17	16	16	16	16	16	17	18
6月	14	13	13	13	13	13	13	14	14
7月	14	14	14	14	14	14	14	14	15
8月	16	15	15	15	14	15	15	15	16
9月	17	15	15	15	14	15	15	15	16
10月	15	13	13	12	13	13	13	13	16
11月	17	14	13	13	13	13	13	14	19
12月	25	18	15	14	14	15	15	18	27
2004年1月	26	19	16	15	15	15	15	17	23

②地中温度の比較

ア. 晴天日の地中温度

図9は正午12:00の地中温度の晴天日平均値を示したものである。但しT3に関してはデータの信頼性のある2003年2月まで、またT2、T4はセンサー移設のため2003年8月までを示してある。最も地中温度が高いのはT4(斜面の裸地)でありT5(平坦面の裸地)やT2(斜面のセダム)よりも常に高い。また、T1(平坦面のセダム)はT5(平坦面の裸地)より低く、2003年8月を除いたほとんどの時期でT2(斜面のセダム)より低い。すなわち、同時刻の地中温度は裸地>セダム植栽地(T4, T5>T1, T2, T3)であり、斜面>平坦面(T4>T5, T2>T1)ということを示していた。

最暑期の8月の12:00の地中温度を比較すると斜面の裸地T4は48.3℃、平坦面の裸地T5は42.6℃、平坦面のセダム植栽地T1は41.0℃、斜面のセダム植栽地T2は38.0℃であった。

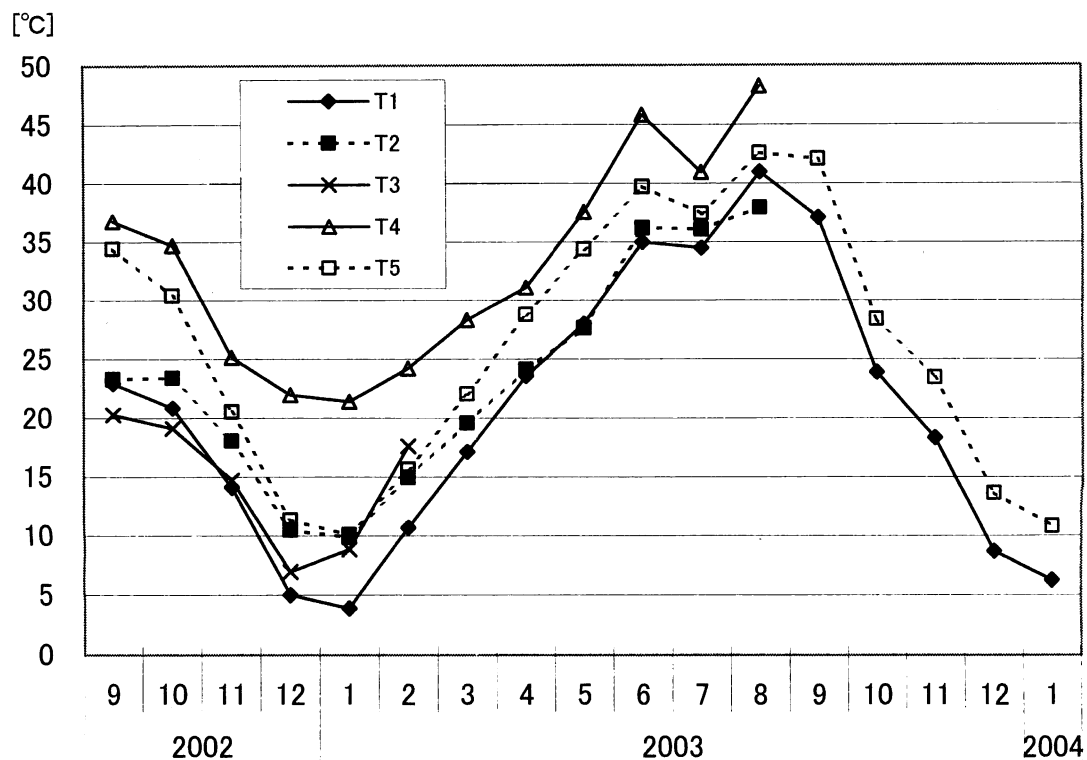


図 9 正午の地中温度比較(但し T3 は 2003 年 2 月まで、T2、T4 は 2003 年 8 月まで)

図10は気象ロボットを設置した2003年7月から2004年1月の期間における地中温度と周囲の外気温を比較したものである。図中暗色側はいずれも外気温より地中温度の方が高い温度となったことを示している。逆に明色側は外気温の方が高い温度となったことを示している。7月から8月上旬にかけては天候が不順だったため気温、地中温度ともに低めであったが、8月下旬以降回復して平年並みの陽気となった。

図10の左図は平坦セダム植栽地T1の地中温度と気象ロボットによって観測された外気温の差を、晴天日を抽出して平均化しアイソプレスで表現したものである。図中で暗色部分が示しているように2003年7月、8月、9月の午後には明瞭な温度差があり、13:00～18:00に約10℃～13℃地中温度の方が気温より高くなった。一方で7:00、8:00には逆に気温の方が1～2℃高くなっている。地中温度T1は10月の午後は4～7℃高く、11月～1月の午後は1～2.5℃高くなった。夜間の地中温度は基本的にセダム植栽地の場合でも気温より高く、気温より低くなるのは明け方日の出前である。右図は平坦裸地の地中温度T5と外気温との差を、晴天日を抽出して平均化しアイソプレスで表現したものである。暗色部分が示しているように7月～10月の暖候期の午後には明瞭な温度差があり、11:00～18:00に約10～16℃地中温度の方が気温より高くなっている。一方で明け方7:00～9:00には逆に気温の方が1～3℃程度高くなった。地中温度T5は11月～1月の午後には1～2℃高く、夜間から早朝、午前には逆に気温の方が1～4℃高くなった。

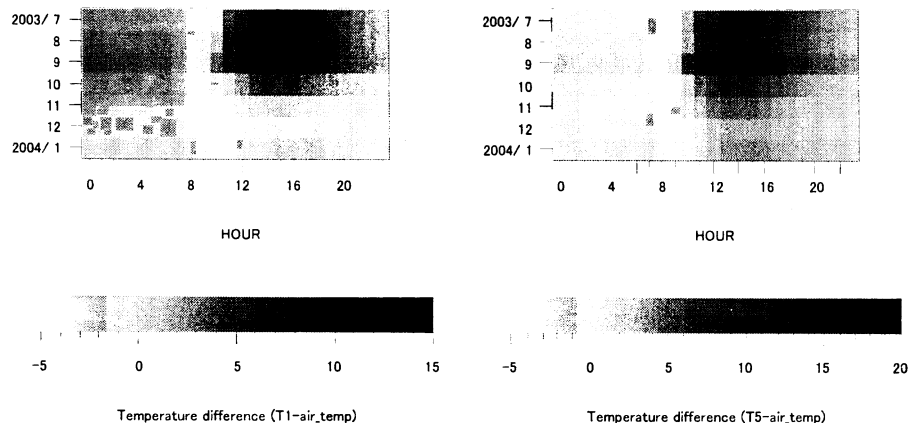


図 10 晴天日平均の地中温度と外気温との比較(左:T1 平坦セダム植栽地、右:T5 平坦裸地)

イ. セダム植栽の有無による比較

図11はセダム植栽の有無によるT5(平坦の裸地)とT1(平坦のセダム)の地中温度を比較した観測全期間のアイソプレスである。図中の暗色部分は裸地の方がセダム植栽地よりも地中温度が高いことを示しており、逆に明色部分はセダム植栽地の方が地中温度が高いことを示している。

T5は平坦の裸地であり同じ平坦のセダム植栽地T1と比較して日中は高い地中温度を示す。しかし、日没時刻以後は逆にT5の方が低くなり、翌日の日の出前に温度差が最大となることが多い。

T5とT1の日中の最大温度差は2002年9月、10月の期間では10～12℃程度あり、最大値は2002年9月20日12:00の14.7℃であった。2002年11月から2003年6月の期間ではおよそ5～7℃高く、最大で2003年1月8日12:00に13.0℃高かった。天候が不順であった2003年7月～8月の期間では2～3℃程度高くなった。9月には一旦7～8℃と高くなるが、10月以降は5℃程度である。

一方夜間はT5の地中温度の方が低温になり、日没時刻以降急激に温度が低下してT1の地中温度より低温となる地中温度の逆転現象が発生する。特に地中温度の高い時期の方が放射冷却によるT5の地中温度の低下具合が大きくなるため、2002年9月、10月および2003年3月～6月の比較の日中の地中温度の高い時期には最大で4～6℃の逆転現象が起こった。その最大値は2003年6月21日8:00で7.3℃であった。一方で日中の地中温度の低い2002年11月から2003年2月の期間は1℃程度しか逆転しなかった。天候が不順であった2003年7月～9月の期間には、晴天になった日は5℃前後逆転したが、それ以外の日はほとんど逆転しなかった。また10月以降日中の気温・地中温度が低下した時期にも逆転することはなかった。

図12は図11から晴天日を抽出し平均化したものである。2002年の9月、10月は天候がよくセダムやその他の植物が多く繁茂していたため、2003年の同時期と比較して日中のT5とT1の地中温度差が大きくなっており(最大で12℃程度)、同時に夜間の逆転現象も4℃と顕著に見られる。2002年10月から2003年6月の期間でも日中には5、6℃の温度差が観測されているが、夜間の逆転現象は1℃程度と明瞭ではない。2003年7月～9月の天候不順の時期には日中の温度差も小さく、夜間の逆転現象もほとんど見られない。10月以降は日中最大で5℃程度の温度差が見られるが、夜間の逆転現象は見られなかった。

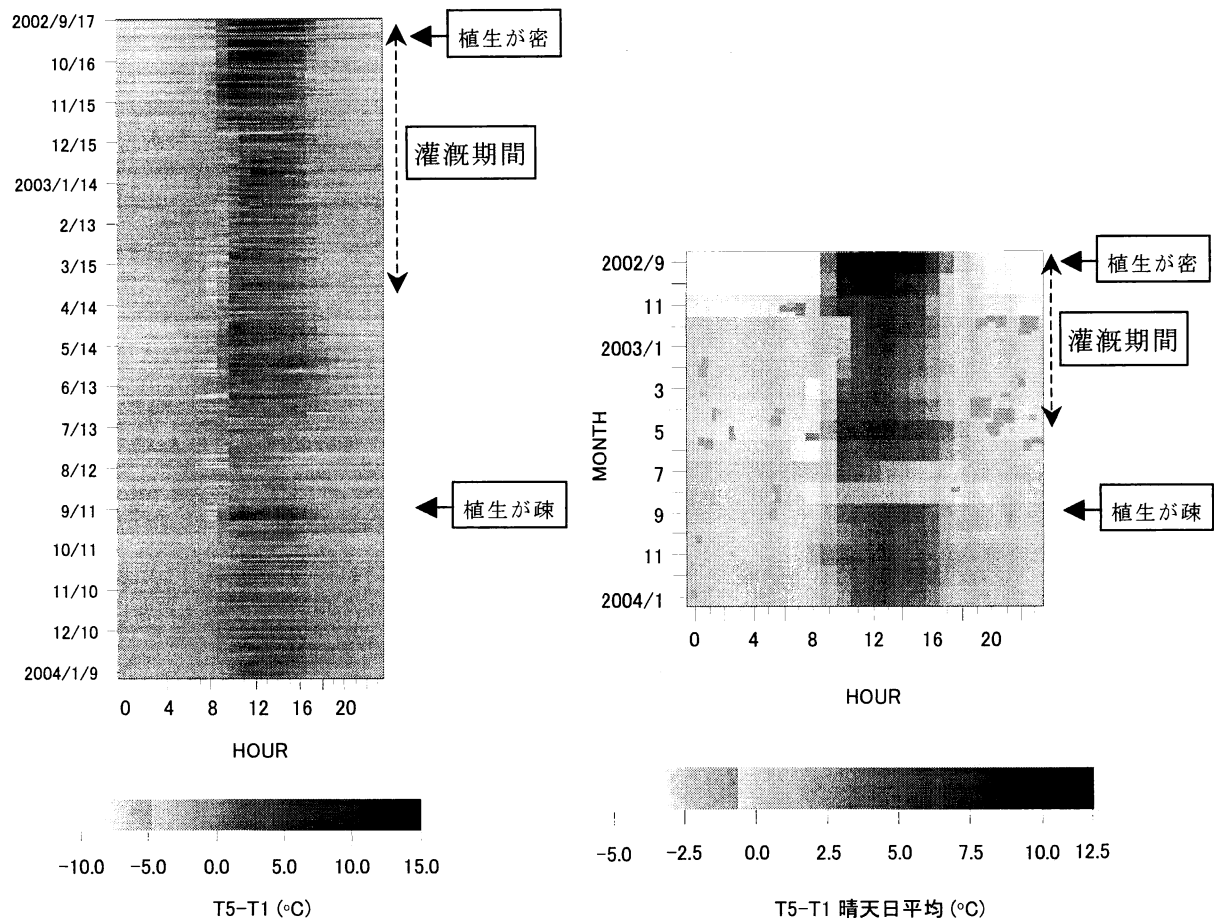


図 11 セダムの有無による地中温度比較 (T5 と T1) 図 12 T5 と T1 の地中温度比較(晴天日平均)

ウ. 平坦と斜面の比較

図13と図14は平坦と斜面の地中温度の比較である。図13は全観測期間(2002年9月17日から観測項目を変更する以前の2003年8月10日まで)のアイソプレスであり、図14はその晴天日平均値のアイソプレスである。

図13、図14の左図はセダム植栽地における平坦(T1)と斜面(T2)の地中温度の比較である。T2は傾斜角度25度の斜面にあり、2002年11月から2003年1月の期間の日中の地中温度は主に13:00または14:00にT1よりも大幅に高くなった。差の最大値は2003年1月8日12:00に11.3℃であった。一方天候が不順であった2003年7月以降は逆に日中の地中温度はT2の方がT1よりも低くなり、最大で2003年8月3日16:00に8.5℃低くなった。

図13、図14の右図は裸地における平坦(T5)と斜面(T4)の地中温度の比較である。T4は傾斜角度25度の斜面上にあり、2002年12月から2003年1月の期間の日中の地中温度はT5よりも大幅に高くなり、しばしば10℃以上高くなった。最大値は2002年12月29日11:00で18.1℃となった。裸地ではセダム植栽地と異なり正午より早い時刻の10:00または11:00に差の最大値が現れた。夕方には平坦と比べて斜面の日当たりが悪くなるため地中温度の逆転現象が発生するが、その最大値は2003年5月9日17:00に9.0℃となった。

セダム植栽地および裸地いずれの場合でも、天候が順調であった2002年9月から2003年6月の期

間では日中の地中温度は斜面のほうが平坦よりも高く、特に図14の左図をみると、太陽高度が低くなる寒候期（12～2月）にはむしろ8℃～12℃と拡大している。これは平坦よりも斜面の方が寒候期の日射入射角が大きくなるため日射量が多くなると考えられ、全天日射量の少ない寒候期の方が暖候期よりもその影響が大きくでるためであると考えられる。

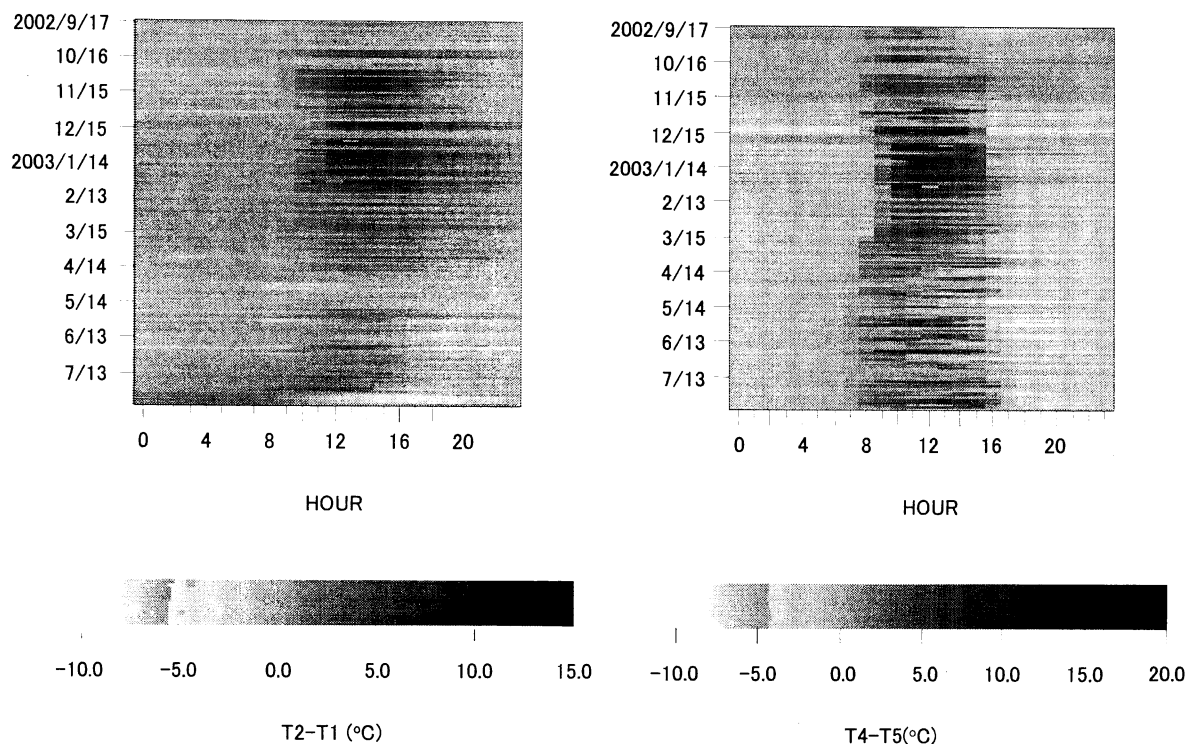


図 13 傾斜の有無による地中温度比較(左:セダム植栽地、右:裸地)

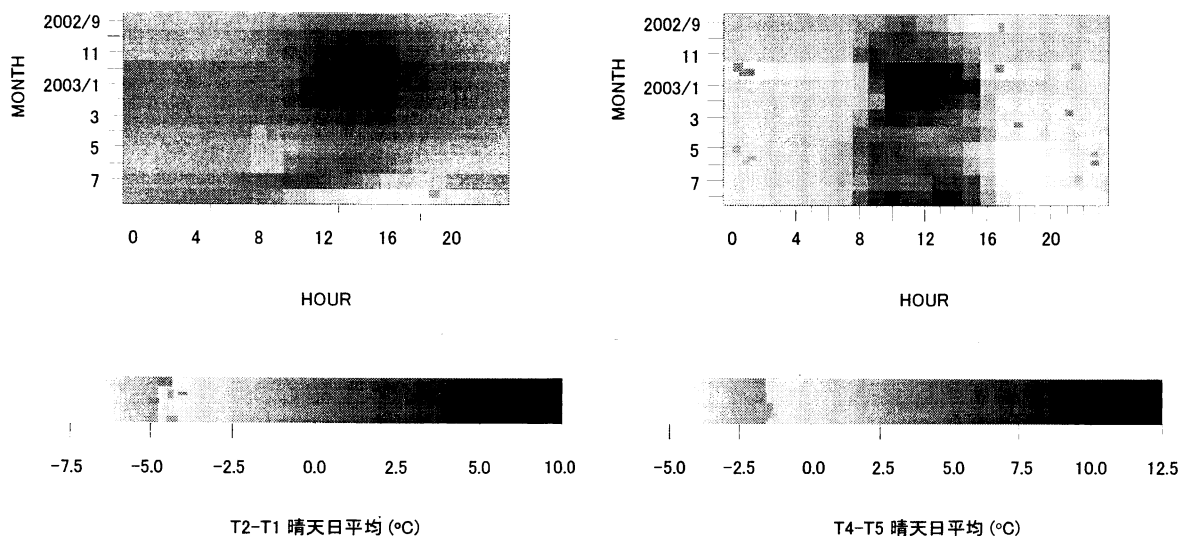


図 14 傾斜の有無による晴天日の地中温度比較(左:セダム植栽地、右:裸地)

エ. 地中温度の日変化

表4は晴天日の地中温度の日較差を各月の平均値で示したものである。セダム植栽のあるT1、T2、T3の方が裸地T4、T5よりも日較差が小さいことがわかる。特に植物が繁茂していた2002年9月、10月では最も日較差が小さいのは平坦セダム密植地T3で、以降平坦セダム植栽地T1、斜面セダム植栽地T2の順である。一方裸地の方は斜面、平坦ともに日較差が大きい。したがって屋上緑化することで建物の表面温度が下がるだけでなく、表面温度の日変化が小さくなることにより周囲の環境への熱負荷が小さくなることが期待される。

表 4 晴天日の地中温度の日較差

(単位℃ T1:平坦セダム T2:斜面セダム T3:平坦セダム密植 T4:斜面裸地 T5:平坦裸地)

	2002				2003												2004
	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1
T1	8.3	10.6	11.5	9.2	9.0	15.5	18.2	19.3	18.9	19.6	18.4	20.0	18.5	15.1	10.8	9.7	8.9
T2	10.0	14.8	18.6	16.2	15.1	20.3	21.4	21.0	20.3	22.1	19.0	14.9					
T3	5.4	8.2	13.2	11.2	13.7	21.1											
T4	22.7	24.1	22.1	26.2	22.4	25.2	27.1	27.1	28.4	29.2	27.3	31.7					
T5	22.6	21.7	18.8	14.3	12.7	19.4	23.8	24.0	26.2	24.7	19.5	21.8	23.8	19.1	14.9	13.8	11.8

③屋上緑化面の地中熱貫流分析

図15は屋上緑化面で観測された毎日の熱貫流データを全期間にわたってアイソプレス形式で表示したものである。正の数値は土中に埋設したセンサー面に対して下向きの、負の数値は上向きの熱貫流(Heat Flux)を示している。センサーHF 1はセダム植栽地の放射収支計CNR-1直下に熱電対T1と共に設置し、センサーHF 2は裸地に熱電対T5と共に設置した。地中温度(T1、T5)の観測結果と同様に、日中の熱貫流は全体としてHF 1(植栽地)の方がHF 2(裸地)よりも小さい。

セダム植栽地HF 1の熱貫流で特徴的なことは、12月18日の屋上全体の大規模な草刈後に日中の正の熱貫流(地面に対して下向き)が増大し、日没後は負の熱貫流(地面に対して上向き)が顕著に観測されるようになった事である(2003年1月以降)。これは裸地に設置したHF 2で同時期に観測される傾向と同じである。セダム植栽地での下向きの地中熱貫流の最大値は、地中温度が高くなるとともに現れ2003年7月23日12:00に82 W/m²であった。上向きの地中熱貫流の最大値は2003年7月11日18:00に64.7 W/m²であった。

裸地に設置したHF 2では、地中温度の高い2002年9月、10月および2003年4月～6月の期間において日中に大量の正の熱貫流(地面に対して下向き)が観測され、日没後にそれに対応するような急激な負の熱貫流(地面に対して上向き)が観測されることが特徴である。地中温度の低い2003年11月～3月の期間も同様の傾向はあるが数値はそれと比較して小さい。裸地における下向きの地中熱貫流の最大値は地中温度が高くなるとともに現れ、2003年6月27日11:00に140.6 W/m²であった。上向きの地中熱貫流の最大値は2003年5月1日18:00に87.4 W/m²であった。

セダム植栽地のHF 1において12月18日の草刈後に観測された熱貫流の傾向は、雑草が枯れて地表に少量のセダム類が残ったために地表面が裸地の状態(HF 2設置場所)に近くなったことが原因と考えられ、3月以降の裸地で観測される数値とほぼ同じで同様の日変化の傾向が見られた。この

ように地中温度が高くなるとそれに対応して日中は地面に対して下向きの熱流が観測されるが、日没後には逆に地面に対して上向きの熱流が観測されるようになる。但しその程度はセダム植栽地よりも裸地のほうで顕著で大量である。

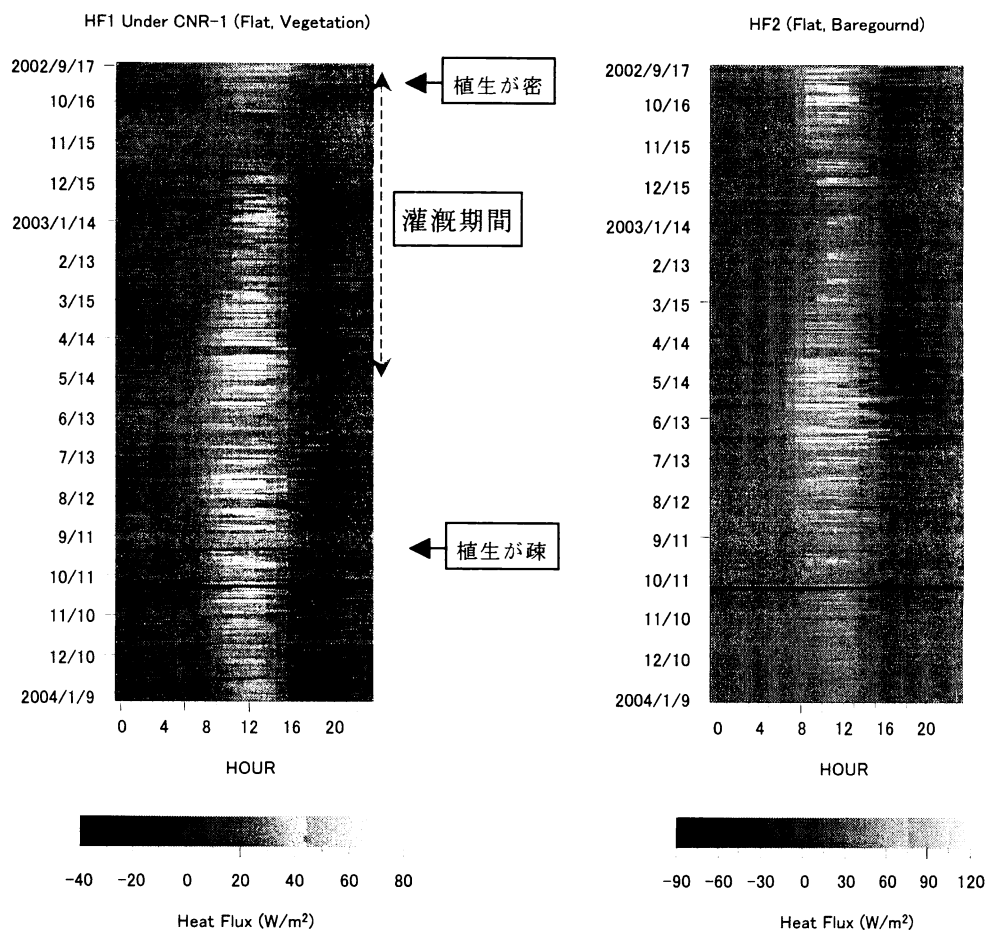


図 15 植栽の有無による地中熱貫流比較(左:Heat Flux 1 植栽地、右:Heat Flux 2 裸地)

図16は晴天日の観測結果をアイソプレス形式で示したものである。図15と同様に正の数値は土中に埋設したセンサー一面に対して下向きの、負の数値は上向きの熱流 (Heat Flux) を示している。正午のセダム植栽地 (HF 1) の地中への下向き熱貫流は、2002年9月、10月では12~20 W/m²で11月には5W/m²程度と一旦減少するものの、12月から2003年2月の期間では12~23 W/m²、3月以降は35 W/m²を超えて同時期の裸地 (HF 2) に近づいている。40 W/m²を超えるような最大値は地中温度が高くなって来る2003年4月から8月の期間に発生し、その最大値は51.9 W/m² (2003年8月11:00) であった。一方で日没後19:00の上向き熱貫流は、9月、10月では10~13W/m²、11月には4 W/m²以下と一旦減少するものの、12月~2003年2月の期間には15 W/m²前後となり、3月以降は20 W/m²を超える。地中温度が高くなる2003年4月以降は7月に最大値30.4 W/m²を示す。このように日中の下向き熱貫流と日没後の上向き熱貫流の大小は対応する関係にある。

裸地 (HF 2) の正午の地中への下向き熱貫流は2002年10月には最大で56.7 W/m²と大きく、それに

対応して夕方の17:00には上向きの熱貫流(43.8 W/m^2)が見られる。地中温度が低下する11月から2003年3月の期間には下向き熱貫流は小さくなるもの、セダム植栽地(HF 1)よりも常に大きく1日の振幅が大きい。下向き熱貫流の最大値は地中温度が高くなる2003年6月の10:00~12:00で $60\sim 65\text{ W/m}^2$ である。一方日没後の上向き熱貫流は地中温度が高い時期には日没前後の時間に大量に観測され、翌朝までじわじわと継続する。

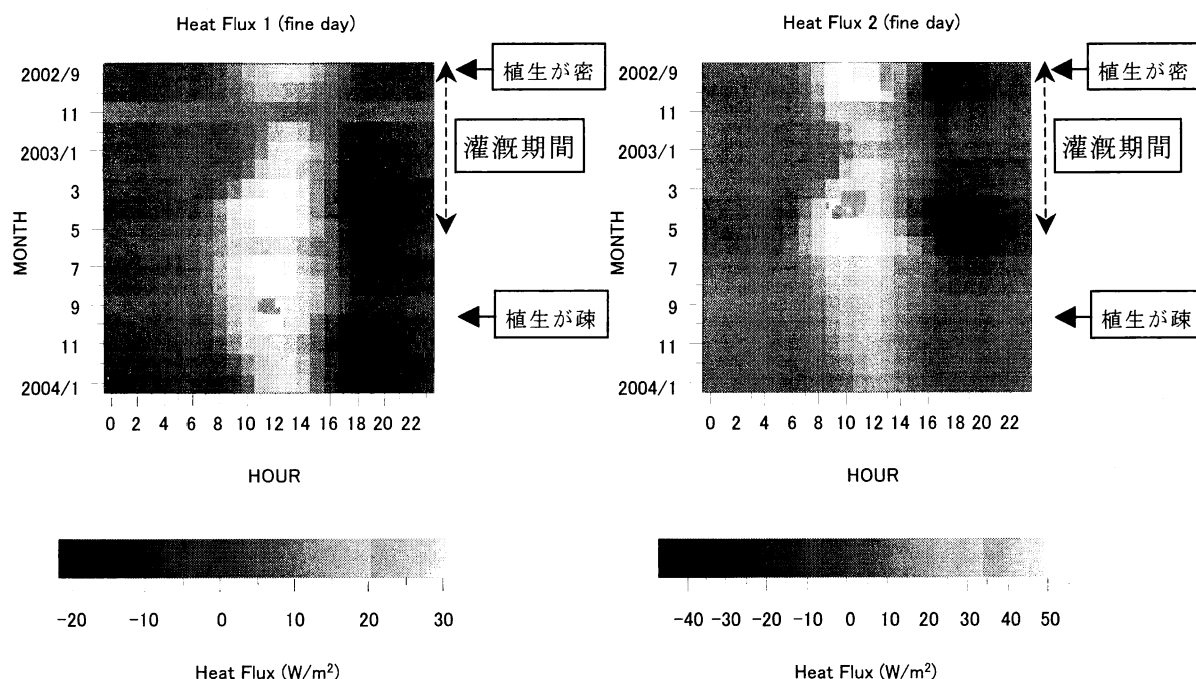


図 16 植栽の有無による地中熱貫流比較(左:セダム植栽地、右:裸地)

(3) 考察

①屋上緑化面上の放射収支

日中の正味放射収支量の年間変化は、暖候期にはおおむね $400\sim 600\text{ W/m}^2$ の範囲内にあり、寒候期では 300 W/m^2 前後となった。年間の最大値は6月27日11:00に 686.7 W/m^2 であった。

夜間の正味放射収支量は通年でおよそ $-100\sim -30\text{ W/m}^2$ の範囲内にあるが、地中温度の高い暖候期には $-50\sim -10\text{ W/m}^2$ の範囲内であった。

正午のアルベドは通年で13~18%となった。

②日中の地中温度の通年観測結果

ア. 日中の地中温度はセダム植栽地の方が裸地よりも低い。それは植生が繁茂することにより地面に対する直達日射量が少なくなるためと推察される。しかし寒候期に植生量が減少して地表面が裸地に近づくと裸地との地中温度差は減少する。翌2003年の暖候期は天候が不順であったため、2002年と比較して日中の裸地とセダム植栽地との地中温度差は明瞭ではなかった。

夜間はセダム植栽地よりも裸地のほうが地中温度は低くなる。これは地表面に植生がないために日没後の急速な放射冷却現象が発生して、地中の熱を大気中に放熱するためと考えられる。セ

ダム植栽地では放射冷却現象が発生しないため、結果として地中温度の日較差は裸地よりも振幅が小さい。夜間の地中温度の逆転現象は灌漑により植生が密であった2002年9月、10月の時期には顕著に観察されたものの、灌漑を停止した翌年は植栽が疎となったため明瞭には観測されず、特に植生が疎となった10月以降はまったく発生しなかった。

イ、日中の全天日射量の多い時間帯の地中温度は平坦面より斜面の方が高い。研究対象地域における南中時の太陽高度は春・秋分で53度、夏至で77度、冬至で30度である。斜面の傾度は25度であるため、秋分または冬至の際の斜面に対する日射入射角は、それぞれ平坦の夏至または春・秋分の際のそれとほぼ同じとなる。したがって日射入射角の大きい斜面側の地中温度は平坦よりも高くなるが、寒候期には地中温度が低くその影響が大きくでるため、地中温度の差は寒候期に拡大する結果となった。

また、夕刻の全天日射量が少ない時間帯には、平坦面よりも斜面の日当たりが悪くなるため地中温度の逆転現象が発生するが、その最大値は2003年5月9日17:00に9.0℃となった。

③セダム植栽による屋上緑化面上の熱貫流特性

裸地の熱貫流特性は、日中には地中への下向き熱貫流が大きく地中温度も高い。一方で、日没直後に大量の上向き熱貫流で観察される放熱現象が短時間に発生するため、地中温度の低下は急速である。この傾向は特に地中温度の高い暖候期に顕著に見られるが、植生が疎になると植栽地と裸地との明瞭な差異はなくなった。

セダム植栽地の熱貫流特性の特徴としては、日中には地中への下向き熱貫流は小さく地中温度は裸地より低く保たれる。日没後に観察される上向き熱貫流(放熱現象)も緩やかなため周囲の大気への影響はより少ないと考えられる。

これらの結果から、セダムを屋上に植栽することにより建物の表面温度を低下させると同時に表面温度の日変化が小さくなるため、周囲の大気への影響を軽減することが期待できるが、地表面の植生量が減少するとその効果も低下することがわかった。

6. 本研究により得られた成果

自律応答型調光ガラスと庇の組み合わせによる外皮計画を導入した建物において温熱環境を実測した結果、年間を通して安定した白濁状況が得られると同時に、上下温度分布の差が低く抑えられ、良好な室内環境が保たれていることが示された。またアンケート調査を行った結果、簡易な手法でありながら快適性が保たれていることが示された。次に空調負荷及び照明電力消費量の計測を行った。その結果、年間を通じて冷房負荷と壁面日射量の間に相関は認められなかったが、照明電力は壁面日射量の増大に伴い減少する傾向がみられた。以上のことより、気象条件以外の要因も考えられるもの、熱流入を抑制しつつ自然光を有効利用できていることが確認できた。したがって導入された各種技術は室内環境を向上させ、エネルギー消費量の削減効果があるといえる。

屋上緑化植物の植栽密度と熱負荷緩和効果の関係及び灌水が熱負荷低減効果にもたらす影響についての観測結果から、降水によって土壌マットが湿潤な状態である場合日中の温度上昇が抑え

られ、植栽密度による日最高温度の差は小さくなった。また、植被率と温度上昇抑制効果は概ね比例関係にあり、その効果は土壌マット表面が湿潤な場合に比べて乾燥した状態で大きい事が判明した。さらに熱収支観測の結果から、土壌マットが湿潤な状態の場合、疎植栽条件よりも密植栽条件で蒸発散量が大きく、日射エネルギーに対する潜熱の割合が大きくなった。一方、土壌マット表面が乾燥した場合は植栽密度による差蒸発散量の差はみられず、日射エネルギーに対する潜熱の割合が小さくなった。植栽ユニットからの熱の出入りは、どの植栽ユニットでも日中は建物へ、夜間は大気へ熱が放出されていたが、密植栽条件では日中・夜間それぞれのピークの値や日内変動量が他と比べて相対的に小さくなる結果が得られた。

地球温暖化研究棟屋上におけるセダムを植栽した屋上緑化面における放射収支、地中温度及びヒートフラックスの長期モニタリングの結果から以下のような成果が得られた。

日中の正味放射収支量は暖候期にはおおむね $400\sim600\text{ W/m}^2$ の範囲内にあり、寒候期では 300 W/m^2 前後となった。夜間の正味放射収支量は通年でおよそ $-100\sim-30\text{ W/m}^2$ の範囲内にあるが、地中温度の高い暖候期には $-50\sim-10\text{ W/m}^2$ の範囲内であった。屋上緑化面上のアルベドは $13\sim18\%$ であった。

日中の地中温度はセダム植栽地の方が裸地より低く保たれるが、植生量が変化して減少すると地表面の被覆状況が裸地に近づくため、地中温度が上昇して裸地との地中温度差は減少する。

夜間の地中温度はセダム植栽地よりも裸地のほうが低くなる。これは地表面に植生がないために日没後に放射冷却現象が発生して地中の熱を大気中に放熱するためと考えられる。一方セダム植栽地では、裸地のような放射冷却現象が発生しないため急激な温度低下は発生しない。そのため地中温度の日較差は裸地よりも小さい。夜間の裸地とセダム植栽地との地中温度の逆転現象は、灌漑により植生が密であった2002年9月、10月の時期には顕著に観察されたものの、灌漑を停止した翌年は植栽が疎となったため明瞭には観測されなかった。特に10月以降の寒候期には全く発生しなかった。

セダム植栽地の熱貫流特性の特徴として、日中の地中温度は裸地より低く地中への下向き熱貫流は小さい。日没後に観察される上向き熱貫流(放熱現象)も裸地と比較して緩やかなため周囲の大気への影響はより少ないと考えられる。

これらの結果から、セダムを屋上に植栽することで建物の表面温度が低下し、同時に表面温度の日変化が小さくなるため、周囲の大気への影響を軽減することが期待できるが、地表面の植生量が減少するとその効果も低下する。

7. 引用文献

- 1) 井上隆ほか：昼光利用の空調負荷計算法，照明コントロールを伴うオフィスビルの空調負荷計算（その1～3），日本建築学会大会学術講演梗概集（1979）
- 2) 井上隆ほか：昼光利用による人工照明制御に関する研究，空気調和・衛生工学会学術論文集（1992～1993）
- 3) 井上隆ほか：窓システム及び人工照明の制御に関する研究（その13），日本建築学会大会学術講演梗概集（2001）
- 4) 井上隆ほか：窓システム及び人工照明の制御に関する研究（その1～その21），日本建築学会大会学術講演梗概集（1994～2003）
- 5) 原園芳信、池田英男、中瀬勲：軽量な人工培地を用いた建物屋上緑化，造園雑誌，52(5)，85-90

(1989)

- 6) 堀口剛、梅干野晃、王革：屋上緑化システムの提案とその熱的性能の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，1523-1524 (1993)
- 7) 梅干野晃、何江、堀口剛、王革：芝生葉群層の熱収支特性に関する実験研究，日本建築学会計画系論文集，462，31-39 (1994)
- 8) 野田坂伸也：屋上庭園の土層の厚さの基準に関する基礎的実験，造園雑誌，38(3)，32-34 (1974)
- 9) 三坂育正、成田健一：緑化による屋外熱環境の緩和に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，677-678 (2002)

8. 国際共同研究等の状況

なし

9. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表（学術誌・書籍）

<学術誌（査読あり）>

- ① M. Chikada, T. Inoue, T. Sawachi, Y. Genchi, and T. Ichinose: Proceeding of PLEA 2001, International Conference on Passive and Low Energy Architecture, 883-888 (2001)
“Evaluation of Energy Saving Methods in A Research Institute Building, CCRH”
- ② T. Inoue: Energy and Buildings, 35, 5, 463-471 (2003)
“Solar shading and day-lighting by means of autonomous responsive dimming glass: Practical application”
- ③ T. Inoue, Y. Yoshida, and T. Ichinose: PLEA2003, G-15, 6-10 (2003)
“Evaluation of Energy Saving Methods in A Research Institute Building: Effects of Thermo-Tropic Glass”

<学術誌（査読なし）>

- ① 一ノ瀬俊明：建設コンサルタント、215，28-31 (2002)
「循環型社会を目指した都市再生戦略～空調にエネルギーを使わない街づくり」
- ② 蓮沼周、井上隆、河野匡志、百田真史、岩淵健一、宮下俊之、山田一樹：空気調和・衛生工学会学術論文集、I，201-204 (2002)
「窓システム及び昼光利用照明制御の組み合わせ制御に関する実証的研究（その8）～自律応答型調光ガラス導入建物における検討～」
- ③ 蓮沼周、井上隆、河野匡志、百田真史、岩淵健一、宮下俊之、山田一樹：日本建築学会大会学術講演梗概集、D-1 環境工学I，359-360 (2002)
「窓システム及び人工照明の制御に関する研究（その18）～自律応答型調光ガラス導入建物における効果の実証～」
- ④ 一ノ瀬俊明：かんきょう、2002年10月号，40-41 (2002)
「環境低負荷型オフィスビルにおける地球・地域環境負荷低減効果の検証」
- ⑤ 井上隆ほか：日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2 環境工学，267-268 (2003)

「窓システム及び人工照明の制御に関する研究（その20）～自律応答型調光ガラス導入建物における効果～」

- ⑥ 新津潔、一ノ瀬俊明：第11回土木学会地球環境シンポジウム講演論文集、11, 253-258 (2003)
「セダムを植栽した屋上緑化面における放射収支、地中温度及びヒートフラックスの観測」

<書籍>

なし

<報告書類等>

なし

(2) 口頭発表

- ① T. Ichinose, T. Inoue, T. Sawachi, and Y. Genchi: ICUC-5 (2003)
“Total adaptation of advanced energy saving technologies to a building of research institute, CCRH”
- ② 一ノ瀬俊明、新津潔：環境科学会年会講演予稿集 (2003)
「セダムを植栽した屋上緑化面における放射収支、地中温度及びヒートフラックスの観測」
- ③ T. Ichinose, T. Mikami, K. Niitsu, and N. Okada: The Open Meeting of the Human Dimensions of Global Environmental Change (HDGEC) Research Community (2003)
“Counteractions for urban heat island in regional autonomies: Activities in councils of MoE, Japan”
- ④ 山本奈美、川島茂人、村上暁信、渡辺達三：平成16年度日本造園学会全国大会 (2004)
「メキシコマンネングサを用いた屋上緑化において植栽密度及び灌水の有無が屋上の熱環境に与える影響」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

- ① 一ノ瀬俊明：地球環境研究センターニュース、12-2 (2001)
「地球温暖化研究棟に適用された先進的省エネルギー・熱環境負荷低減技術群」
- ② 地球環境研究センター：国立環境研究所公開シンポジウム、ポスター展示 (2002)
「地球温暖化研究棟：環境にやさしいオフィスビル」
- ③ 一ノ瀬俊明：第10回土木学会地球環境シンポジウム、パネル展示 (2002)
「地球温暖化研究棟：環境にやさしいオフィスビル」
- ④ 一ノ瀬俊明：環境省地球環境研究総合推進費一般公開シンポジウム、講演 (2002)

「地球温暖化対策としての環境保全建築手法の効果について」

- ⑤ 地球環境研究センター：第2回つくばテクノロジーショーケース，ポスター展示（2003）

「環境低負荷型オフィスビルにおける地球・地域環境負荷低減効果の検証」

- ⑥ 地球環境研究センター：国立環境研究所公開シンポジウム，ポスター展示（2003）

「環境にやさしく快適なオフィスビル「地球温暖化研究棟」の検証」

- ⑦ 一ノ瀬俊明：第11回土木学会地球環境シンポジウム，パネル展示（2003）

「地球温暖化対策としての環境保全建築手法：地球温暖化研究棟の取り組み」

10. 成果の政策的な寄与・貢献について

- ① 環境省ヒートアイランド関連委員会への資料提供

ヒートアイランド対策関係府省連絡会議の「ヒートアイランド対策に係る大綱」づくりに大きな寄与が期待される。

- ② 国立環境研究所省エネルギー対策検討小委員会への資料提供

- ③ 環境省平成16年度石油特別会計によるプロジェクト「建築物における空調・照明等自動コントロールシステム技術開発」の立ち上げに貢献した。

11. 資料

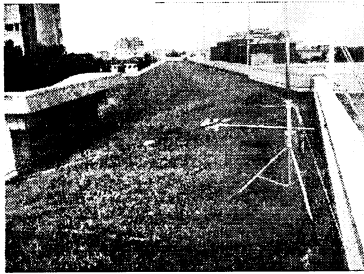
- ① 目視による植栽の時系列変化(屋上緑化面西側)

- ② 目視による植栽の時系列変化(屋上緑化面東側)

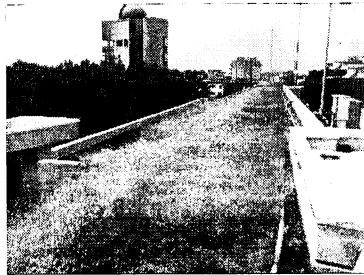
- ③ 植栽が疎な時期における国立環境研究所地球温暖化研究棟周辺の表面温度の日変化

- ④ 植栽が密な時期における国立環境研究所地球温暖化研究棟周辺の表面温度の日変化

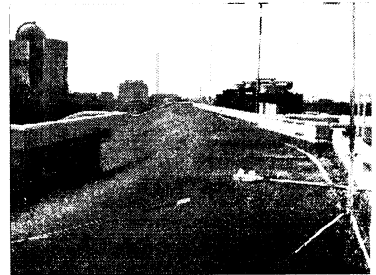
資料 1 目視による植生の時系列変化(屋上緑化面西側)



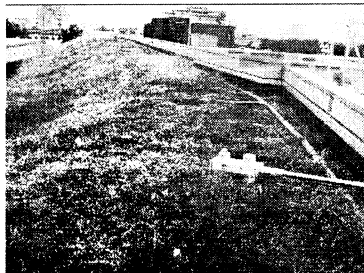
2002/08/27 10:09:28



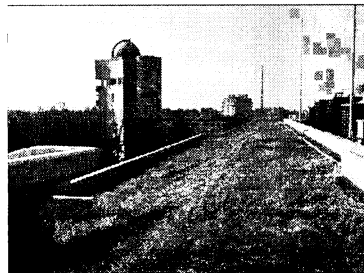
2002/09/10 10:47:38



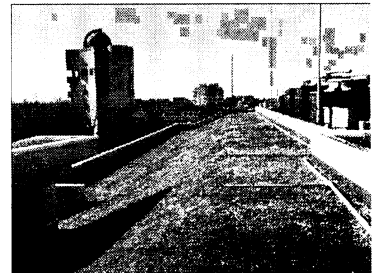
2002/10/04 12:13:40



2002/11/08 10:31:56



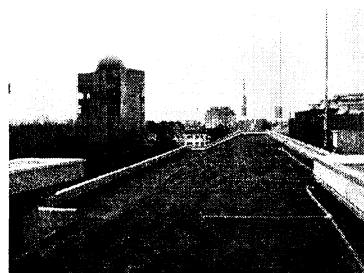
2002/12/02 10:27:56



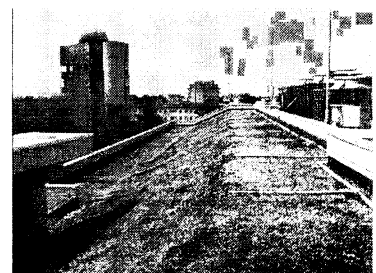
2003/01/06 11:03:12



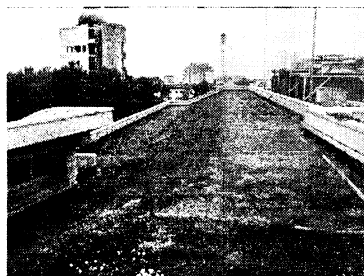
2003/02/03 10:56:02



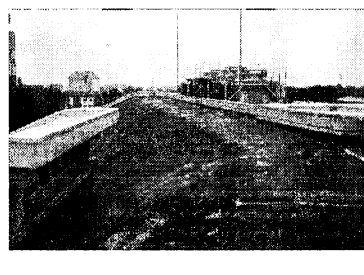
2003/03/03 10:19:44



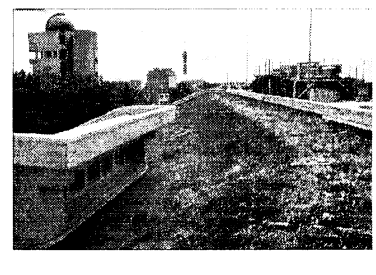
2003/04/03 10:07:14



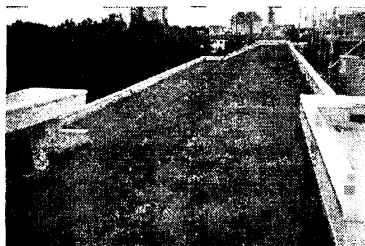
2003/05/07 10:20:54



2003/06/04 11:47:16



2003/07/09 14:14:06



2003/08/19 17:28:08



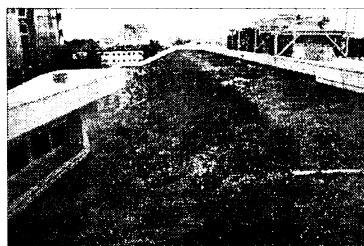
2003/09/04 12:09:18



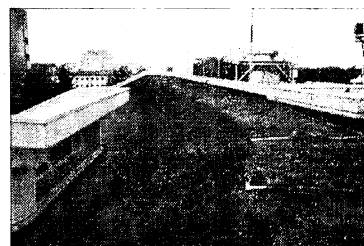
2003/10/09 12:53:50



2003/11/12 10:25:20



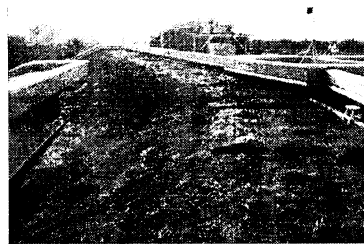
2003/12/12 13:26:48



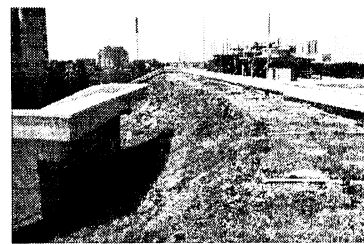
2004/01/19 12:17:30



2004/02/18 10:42:44



2004/03/10 16:27:36



2004/04/06 11:14:28



2004/05/06 10:23:50

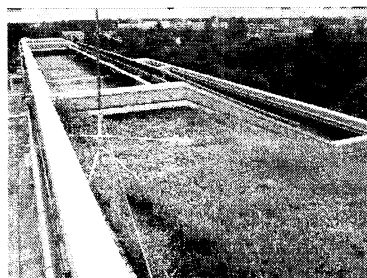


2004/06/03 11:18:26

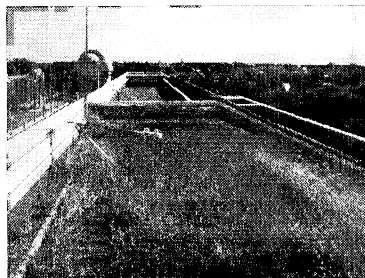
・灌水期間は2003年5月末までである

・2002年の暖候期は植生が密であったが、翌2003年の暖候期には植生は疎となった

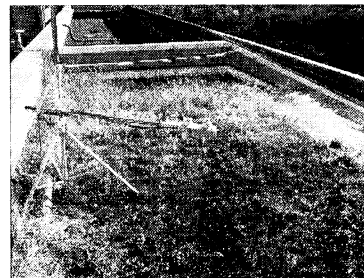
資料 2 目視による植栽の時系列変化(屋上緑化面東側)



2002/09/10 10:47:00



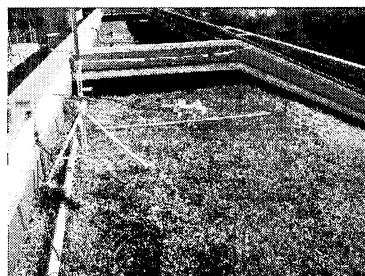
2002/10/02 9:46:36



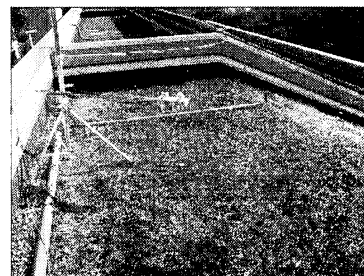
2002/11/06 10:04:44



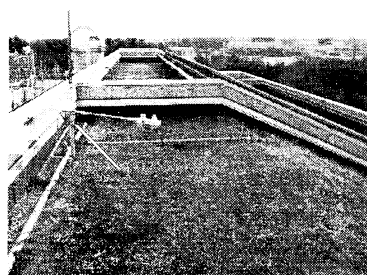
2002/12/04 11:02:54



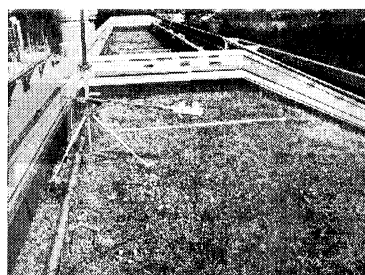
2003/01/06 11:02:42



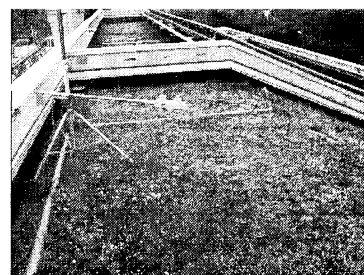
2003/02/03 10:55:36



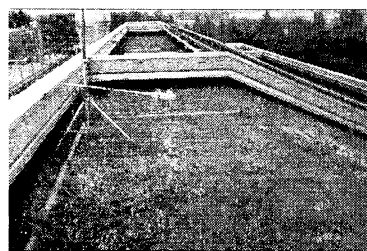
2003/03/03 10:19:08



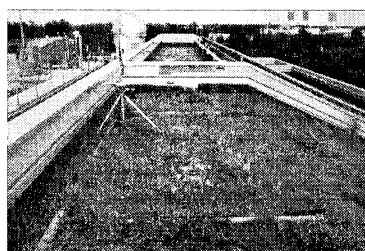
2003/04/01 14:33:40



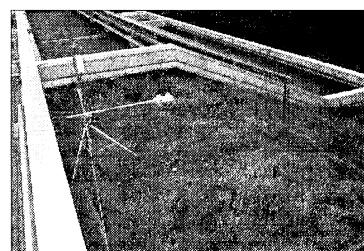
2003/05/07 10:20:32



2003/06/04 11:46:46



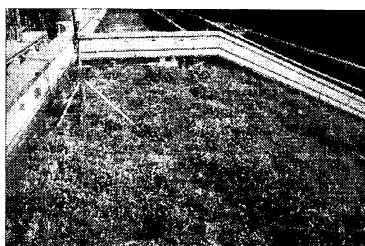
2003/07/09 14:12:34



2003/08/19 17:27:54



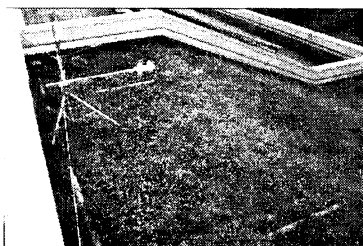
2003/09/04 12:08:02



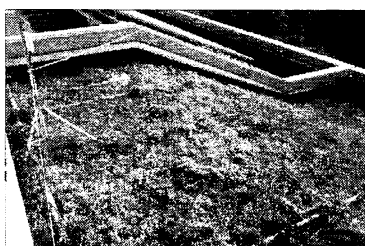
2003/10/09 12:53:10



2003/11/12 10:24:54



2003/12/12 13:26:00



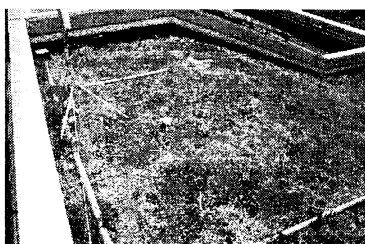
2004/01/05 10:23:02



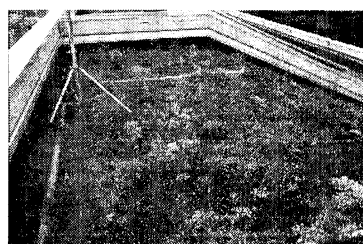
2004/02/18 10:42:00



2004/03/10 16:27:10



2004/04/06 11:13:34



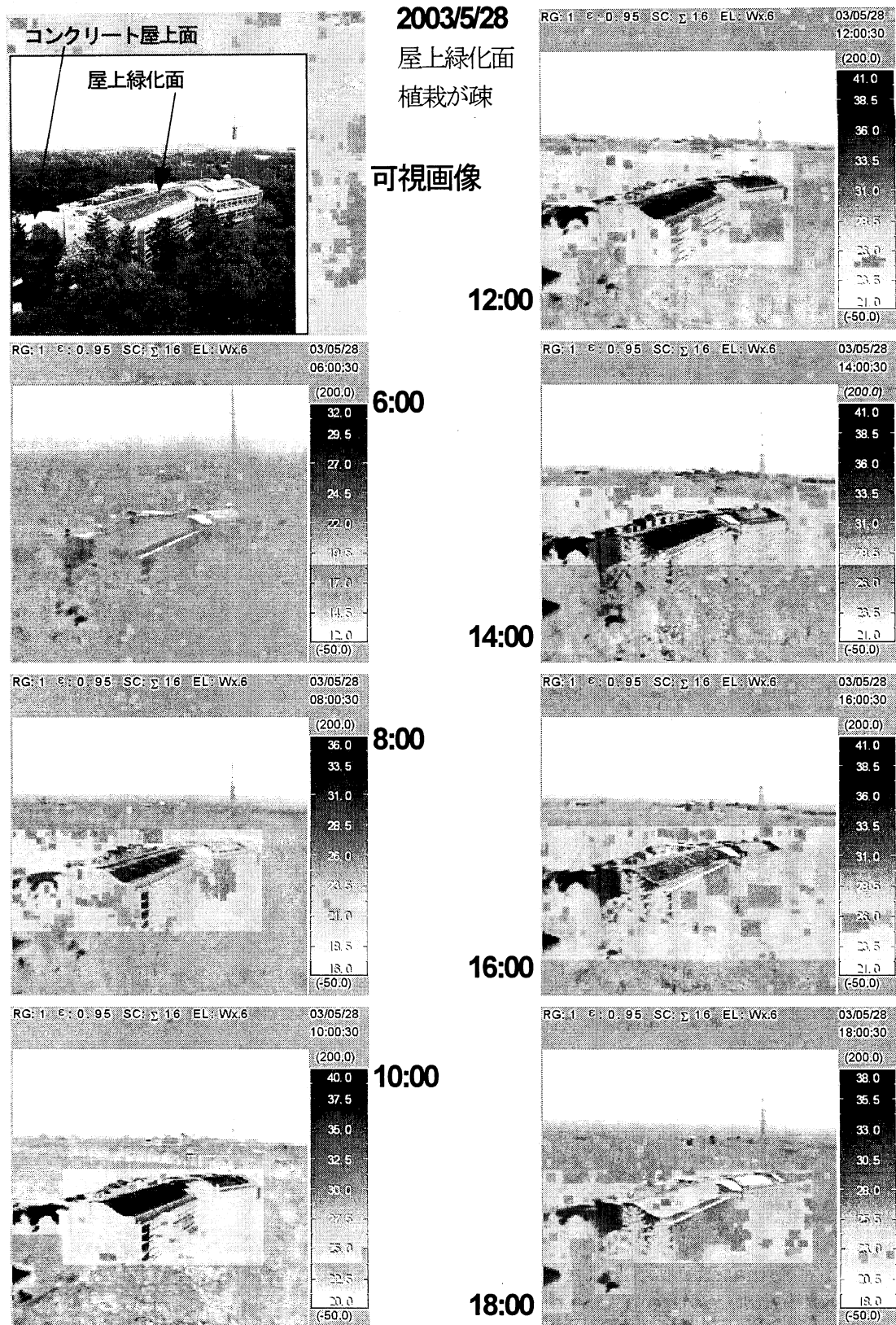
2004/05/06 10:23:10



2004/06/03 11:17:38

- ・灌水期間は2003年5月末までである
- ・2002年の暖候期は植生が密であったが、翌2003年の暖候期には植生は疎となった

資料3 植栽が疎な時期における国立環境研究所地球温暖化研究棟周囲の表面温度の日変化



植栽密度が粗であり土壌が露出している時期の屋上緑化面の表面温度は、晴天日日中にコンクリート屋上面に近い温度まで昇温していることがわかる。

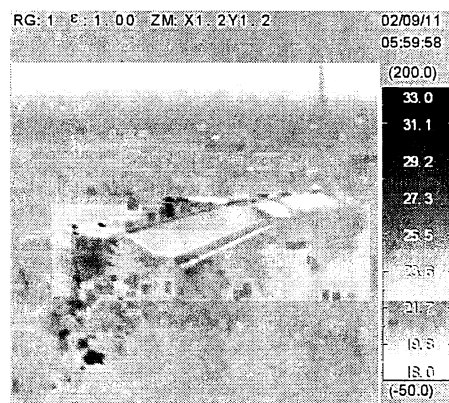
資料4 植栽が密な時期における国立環境研究所地球温暖化研究棟周辺の表面温度の日変化



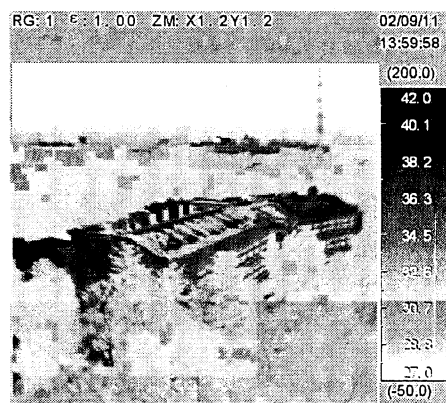
2002/9/11
屋上緑化面
植栽が密

可視画像

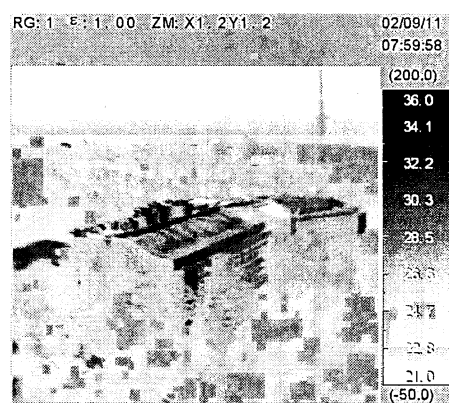
12:00



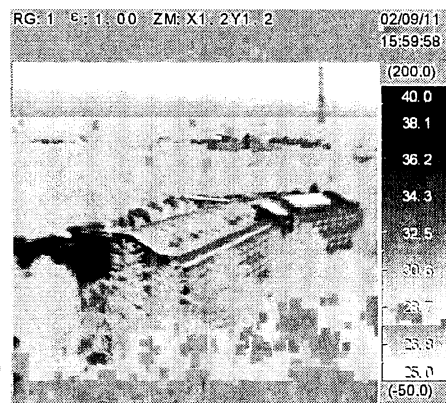
6:00



14:00



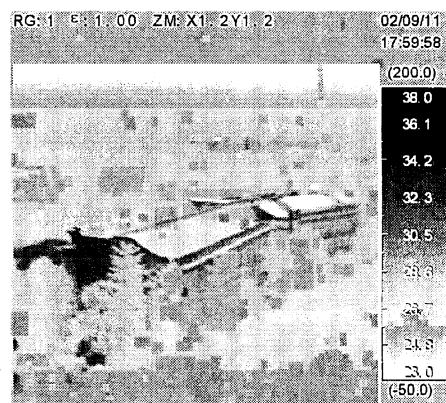
8:00



16:00



10:00



18:00

植栽密度が密な時期における晴天日中の屋上緑化面の表面温度は、周囲の樹木の葉面温度と同程度であり、植栽により日中の昇温が抑制されていることがわかる。