特集「建築物緑化による都市の環境改善」

建築物緑化の温熱環境改善効果に関する既往研究レビュー

鈴木弘孝¹⁾

1)(財)国際花と緑の博覧会記念協会 suzuki@expo-cosmos.or.jp

1. はじめに

ヒートアイランド現象緩和のためには、地表面被覆改善策として都市緑化の推進が有効とされているが、その取り組みを具体的に推進するためには公園緑地や街路樹、河川等の公的空間の緑化とともに、市街地面積の大半を占める私有敷地の緑化が重要な役割を担っている。中でも、地表面をコンクリートとアスファルトで被覆された都市の市街地部にあっては、建物の屋上や壁面等を緑化する建築物緑化が重要な対策になると考えられる。建築物緑化を具体的に推進していくためには、住民や企業等の建築主の理解と協力が必要不可欠となる。筆者らが行ったアンケート調査の結果¹⁾等より引き出された建築物緑化の技術的課題として、屋上緑化に従事する企業等では緑化による温熱環境改善効果を緑化の担い手となる住民や企業等がわかりやすく理解できることが必要との認識を示しており、その効果を具体的な数値として定量化できることが必要であると考えられる。

一方、都市のヒートアイランド現象を緩和していくため、近年ではその対策効果を都市全体でマクロに評価するシミュレーション技術も大きく発展しつつある。しかし、シミュレーションを行う場合には、地表面被覆状態の違いに応じた数値計算上の基礎となる入力条件として、緑化した場合の使用植物や緑化の方法に応じた放射収支や緑化表面からの蒸発散による熱収支等についての具体的な効果を示す基礎データが必要となる。街路樹や屋上緑化についての研究蓄積が進みつつある一方で、壁面緑化による温熱環境改善効果については実証的なデータが不足しており、いまだ十分な蓄積を持ちえていない状況にある。

以下に、建築物緑化の温熱環境改善効果に関する既往研究の状況について概括する。緑化による温熱環境改善効果としては、建物敷地における日射遮蔽による建物の壁面温度の上昇を抑止し、建物内部側への伝導熱による負荷を軽減する効果、植物の蒸散作用による気化熱を潜熱として消費するとともに、植物による緑化表面での日射反射の抑制により、建物外部側への顕熱の抑制効果などが指摘できる。日射の遮蔽や日射の反射、熱放射による顕熱の発生等については放射環境の評価として捉えることができる。また、植物や土からの蒸発散による潜熱の消費については、緑化面での熱収支の側面から捉えることができる。

2. 表面温度、放射環境に関する既往研究

2.1 屋上緑化

屋上緑化に関しては、すでに民間部門においても技術開発や普及が進んでいる段階にあり、そのヒートアイランド緩和効果に関しても、実験・計測に基づくデータや資料が整備されつつある。

梅干野ら²⁾は、屋上緑化(芝生)による建築物への照り返し、焼け込み防止に関する効果について、温度変化に加えて日射反射率や水収支を計測する実証実験を行い、夏季の芝生の照り返しは乾いた土と比較して $150 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ 少なく、スラブと比較した照り返し量は $1,000 \text{ kcal/m}^2\text{day}$ (スラブ比) 少ないことから、含水率で成果が左右される土より有効であることを示した。野島ら³⁾は、屋上緑化による夏期の建築物及び都市の温熱環境の改善効果を把握するために、カンツバキ植栽地、舗装面、日陰の舗装面の3仕様の温熱環境の違いと植栽地葉面からの蒸発散速度等の測定を行い植栽地の温度上昇の抑止力、屋内への熱の流入の抑止力について、実測により検証している。

梅田ら⁴⁾は、軽量の植栽基盤と芝生を組み合わせた屋上緑化パネルの熱収支を把握するため、屋上での暴露実験により試験体の体積含水率、上下温度分布、上下熱流量、構成材の熱伝導率について計測を行った結果から、体積含水率と熱伝導率の関係を解析し、試験体材料別の含水状態から芝生植栽の熱伝導率の推測が可能となることを報告している。

峰村ら⁵⁾は、屋上緑化による建築物への熱環境の改善効果の定量化を目的に、表面温度、地温、熱流の測定により、断熱層上面地温とスラブ下面温度の差と断熱層の熱流間に高い相関があることを報告した。また、夏季の緑化区では非緑化区の下向き最大熱量は7.3%に抑制され、冬季の上向き熱量も59.0%に抑制されるとしている。

山田ら⁶⁾は、屋上断面を想定した木組みの実験装置を用いて、断熱性能を有するポリスチレンボードをコンクリート版で覆った対象区と人工土壌、改良土壌の二種にノシバを植栽した植栽区と無植栽区を設定し、熱遮蔽効果を比較した結果、コンクリートスラブ面に植栽基盤を敷設し、緑化部分の熱遮蔽効果だけで外断熱を行う工法は、夏季の外部熱の遮蔽について優れた性能を発揮するが、冬季の断熱性は低く、断熱材の上に緑化を行う方が保温性の向上につながることを指

摘している。同じく山田⁷⁾は、既存の草屋根住宅を対象として屋根緑化直下の室内での実測値を元に草屋根部分をコロニアル仕上げに置き換えた場合との屋内熱貫流量の差異を推計し、屋内での一日の空調負荷量を比較した結果、草屋根仕様では $12.7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{日}$ に対して、コロニアル仕様では $278.2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{日}$ となり、草屋根仕様では約 $1/21$ に縮小し、省エネ対策としての有効性を示した。

山本⁸⁾は、植物の量と灌水の有無が熱負荷緩和効果に与える影響を明らかにすることを目的として、土壌マットに占める植物の面積割合と灌水の有無により、植栽ユニットを設定し、表面温度とユニット下の温度を計測した結果、植栽ユニットの表面温度については、植被率と温度上昇抑制効果は概ね比例し、その傾きは土壌マットが湿潤な場合に比べ、表面温度が乾燥した状態で大きいことを報告している。

萩島⁹⁾は、大規模な 13 層の階段状屋上庭園(緑化斜面)を有する建物の周辺微気象を対象として、7 月上旬から 11 月中旬の約 4 ヶ月の長期観測の結果から、静穏な夜間には緑化斜面下部では、継続時間 20~80 分程度の上昇気流が間欠的に発生し、斜面下端付近の最大流速は約 0.5 m/s 、斜面上下の最大温度差は約 1°C であったことを報告している。

尾之上¹⁰⁾、三坂¹¹⁾は、都市緑化による都市熱環境の緩和に関する効果的な手法を検討するために、前述の階段状の緑化斜面を有する建築及び周辺の実測を行い、熱収支測定の結果、日中の蒸発散と夜間の放射冷却により周辺の暑熱環境の緩和効果への貢献を明らかにしている。

中西¹²⁾は、屋上緑化による熱負荷の軽減を調べた結果、無灌水の場合には断熱効果は高いものの顕熱フラックスが大きく緩和効果は小さいが、灌水した場合には周辺空気の上昇抑制効果が獲られることを報告している。

山本¹³⁾は、管理負荷が低減できる薄層緑化技術の開発を目的に、土壌と植栽の種類の差異による温熱環境を計測し、厚層土壌環境が示す上空温度と土壌及びスラブ表面温度の低減効果が大きく、薄層のセグムの場合には基盤構成の違いで差が生じることを報告した。

佐保¹⁴⁾は、屋上緑化の低減効果の実測を行い、屋上緑化による温度低減効果は夏季に大きく、土壌の厚さは 20 cm 程度が必要で、省エネルギー効果は 20 kw/m^2 と推定した。

角田¹⁵⁾は、土壌の熱伝導率と日射の相関関係を調べ、植栽がある場合は $1/10$ 程度の断熱性能があることを確認した。

足永¹⁶⁾は、スポット式放射センサーを用いた全球的長短波計測を行い屋外空間における連続的な強度分布の放射強度を積算する方法と、局所放射強度を積算する方法を提示し、検証の結果、総熱量評価に関する有効性を明らかにした。

浦野¹⁷⁾は、放射熱収支過程に着目した数値解析と建築内部への伝熱解析を連成し、消費エネルギーの定量的削減効果の数値化を行った。吉田¹⁸⁾は、NCRO 1 を用い、緑化による温熱環境への影響を調べた結果、芝生の場合には主流方向の緑化に関しては地上部の方が効果は大きいことを報告している。

2.2 壁面緑化

壁面緑化による温熱環境改善に関する既往の主な研究例として、梅干野¹⁹⁻²⁰⁾は、ベランダにつる植物(ヘチマ)を用いた被覆を行い、建築内部への日射遮へい効果を検討した。計測は、植栽の有無の試験区を設け、冷房された室内の温度と日射の放射量との関係を計測し、長短波放射量の低減(中でも短波の軽減)に効果があり、室温の上昇を抑制する効果を報告している。また、梅干野²¹⁾は、ヘチマとアサガオを用いた植栽スクリーンを製作し、夏季の晴天において、植栽スクリーンの日射透過特性と表面温度分布を計測した結果、いずれの植物も葉の表側の表面温度は日射量との相関が強く、日射量 $300 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ 前後では表面温度は気温とほぼ等しく、日射量がそれ以下では気温より低く、日射量がそれ以上では表面温度が気温よりも $2\sim3^\circ\text{C}$ 上昇することを報告している。さらに、梅干野²²⁾は、西壁一面にナツツタをはわせた住宅での実験結果から、ツタスクリーンの室内環境に及ぼす影響や日射遮蔽効果を検討し、ツタスクリーンではコンクリート打ち放しの外壁と比較すると、最大時で表面温度は 10°C 近く低く、日射による外壁表面での熱流入量は約 $1/4$ となり、西日の影響をほぼ取り除くことができること等を明らかにしている。

沖中²³⁾は、壁面緑化による夏季の壁面温度上昇の抑止力、屋内への熱の流入の抑止力について、鉄筋コンクリート造の生活者が存在する一般住宅を対象に実測により検証している。野島²⁴⁾は、壁面緑化による夏季の壁面温度上昇の抑止効果について、緑化された壁面と植物の無い壁面の壁面温度、壁面での熱流の経時変化を天候の異なる日に内冷房の条件で計測した。また、葉からの蒸散量、幹での樹液流速の計測、熱赤外線の実測を行った結果、壁面緑化により壁面温度は約 10°C 低下し、緑化による温度の低減量が大きくなるにつれて蒸散量が大きくなる傾向があるとしている。温度低減効果は、梅干野による植物スクリーンによる壁面温度低減効果及びナツツタによる西日の温度低減効果²¹⁻²²⁾とも一致している。

さらに野島²⁵⁾は、無被覆壁面での屋内へ流入する 24 時間の積算熱流量が $13.6\sim40.7\%$ に削減する熱の流入抑制効果を計測により明らかにした上で、電力使用料に換算している。

伴²⁶⁾は、壁面緑化が夏季の室内温熱環境に与える影響について、シミュレーションによるケーススタディーを行い、緑化された外壁の表面温度と熱流を求め、表面温度の算出結果が既往研究の計測結果と概ね一致し、外壁を緑化することで断熱材がない場合には流入熱が大きく減少し、断熱がある場合にも、室内側への流入熱が非常に小さくなることを明らかにした。

近藤²⁷⁾は、ツル植物による構造物緑化の環境効果の定量化について、モルタルのり面、石堀(ブロック堀、大谷石堀)、遮音壁の構造物面を緑化することによる表面温度の比較により、温度の上昇抑止効果を検証している。高尾²⁸⁾は、ポリプロピレンを材料とする基盤材にコケを用いて、乾

乾燥状態と湿潤状態における日射反射率を入射角との関係において比較を行い、乾燥状態では入射角が大きくなるほど反射率が高いことを実証している。渋谷ら²⁹⁾は、パネル設置型と下垂型の壁面緑化工法を用いて壁面の表面と裏面の温度、壁面貫熱流量を計測し、パネル型の方が下垂型よりも環境緩和効果の高いことを報告している。

鈴木ら³⁰⁾は、緑化パネルとコンクリート壁（白色塗装）を試験体の実験計測を行い、表面温度と放射収支を検討した結果、コンクリート壁面に対する緑化パネルの表面温度は、夜間で3℃程度低く、日中は、植物による相違が認められたこと、コンクリート壁に対する緑化パネルのアルベド低減率は、日中平均で約62～65%であったことを報告している。

さらに鈴木ら³¹⁾は、MRT、WBGT、SET*の温熱指標で壁面緑化による温熱効果を評価した結果、緑化パネルではコンクリート壁よりもMRTについてピーク時に約11℃低減、WBGTについてピーク時で1～2℃、SET*について終日1～2℃低減し、各指標により緑化パネルでの温熱環境改善効果を定量的に評価した。

以上の結果、既往の研究例の主たる分析のうち、屋上緑化による温熱評価に関する研究については、建物の内部側、外部側とも実測による研究蓄積が図られてきている。これに対して、壁面緑化については建物の室内側への熱負荷低減に重きが置かれており、壁面外部側についても日射の遮蔽と透過等についての検証は行われているが、壁面の表面温度についての分析が中心であり、建物外部の放射環境について実測により定量的に検証した研究の蓄積はなお十分とは言えない。

3. 蒸発散による潜熱の評価、熱収支に関する研究

3.1 屋上緑化

屋上緑化における蒸発散作用の温熱効果に関する既往の研究については多数の報告例がある。

野島ら³²⁻³³⁾は、各種の造園植物の蒸散速度をスーパーポロメーターにより計測し、大気飽差と光量子束密度に基づく蒸散環境変数を用いた回帰式で蒸散速度を推定するとともに、屋上においてカンツバキとヘデラカナリエンシスを用いて、計測した蒸散速度に葉面積指数を乗じて、1 m²あたりの蒸散による潜熱消費量を推定している。三小田ら³⁴⁾は、屋上芝生植栽における熱的特性を計測し、導入効果の検討を行った結果、日射反射率の軽減と表面温度の低減（-100 kcal/m²h）断熱性の高さを報告している。

谷本ら³⁵⁾は、屋上緑化における地表面からの蒸発量に関する簡易計算方法に関して、従来提案されてきた飽和度あるいは蒸発比を定数とする方法では、土壌の熱伝導のみを解析対象とし、水分移動を考慮しないために精度に欠けるとし、土壌を一点集中定数化した水分収支で表現して土壌の熱伝導方程式と水分収支式を連立させて解く方法で精度誤差の少ない簡易計算が可能とした。

加藤ら³⁶⁾は、厚さ8 mmの薄層土壌における土壌水分量と日射量を測定し、重量法により測定した蒸発散量との関係を解析した結果、ティフトンシバによって緑化した試験区の蒸

発散量は土壌中の水分量と日射量に伴って増加することを明らかにし、日射量当たりの蒸発散量を基に人工地盤上の芝生の必要土層厚の試算を行っている。

中山ら³⁷⁾は、クスノキとユリノキの幼木を対象に、蒸発散量の推定方法として気温、日射量の関係からMakkinkの日射法の応用が可能であることを結論づけている。壽浦ら³⁸⁾は、常緑の低木植栽を対象として、既存の蒸散特性に関する計算モデル（Jarvisモデル）と交互異性有効放射の計算モデルを用いることにより、蒸散量推定モデルを構築し、モデルの検証を行い、都市緑化について高温化緩和の観点から評価可能性を示唆している。

恩村ら³⁹⁾は、不織布に植栽された芝生の蒸発冷却効果を検討するため、蒸発量について風洞実験を行い、定常熱水分移動モデルによる解析結果との比較により、芝生内での熱抵抗値、湿気抵抗値を確認し、芝生内での日射吸収の割合、熱伝達率の値を推定した。

同じく、王ら⁴⁰⁾は、屋上での芝生表面からの蒸発散量に関連する気象要素として、日射、気温、湿度、風速について検討した結果、日射量との間に正の相関、相対湿度との間に負の関係が認められることを報告している。

何江ら⁴¹⁾は、屋上芝生の熱的特性に関する等価的熱抵抗の導入により、芝生の電熱モデルを提案し、芝生の熱収支計算のアルゴリズムによって計算した表面温度と測定値を比較し、モデル式の妥当性を示している。

また、山口ら⁴²⁾は、軽量薄層な屋上緑化施設のもつヒートアイランド緩和効果を定量的に検討するため、芝生とセダム等6種類の緑化試験体を建物屋上に設置して、蒸発散量の計測と熱収支解析等を行った結果、芝区は灌水頻度が減少しても、一定の蒸発散量を維持したのに対して、セダム区では灌水頻度を減らすと蒸発散量の減少が顕著であることを報告している。

三坂ら⁴³⁻⁴⁴⁾は、緑化による都市環境の緩和に関する効果的な手法について検討を行うことを目的として、草地を対象として熱収支の比較測定を渦相關法と傾度法等の複数の測定・解析手法を適用して比較・検討を行った結果、いずれの計測方法も日中における潜熱消費量の大きいことを明らかにし、熱収支解析より、草地からの蒸発散による多量の潜熱消費により、気温の上昇が抑えられていることを報告している。

大野ら⁴⁵⁾は、薄層緑化植物として用いられている芝生とメキシコマンネングサを用いて、無植栽区との比較により蒸散速度を計測し、入射光エネルギー、大気飽差との関係を解析した結果、芝生区と無植栽区では、入射光エネルギーと大気飽差の増加に伴い、蒸散速度も上昇するのに対して、マンネングサ区では光エネルギーが高い場合には、飽差の増加とともに蒸散速度が減少し、異なる挙動を示すことを報告している。同じく、大野ら⁴⁶⁾は、同じ試験区において群落表面温度と蒸発散量、土壌含水率、分光反射率との関係について解析した結果、群落表面温度については各試験区において明瞭な差は認められず、土壌含水率が高い場合には温度は低くなり、土壌が乾燥した条件よりも湿潤な条件の方の反射率が高

いことを示した。

小野⁴⁷⁾は、黒土とパーライト系の人工軽量土を用いて、3種類の土壌厚につき、それぞれ裸地と3種の植物を植栽した試験区を設け、夏・秋・冬・春の4シーズンの蒸発散量を小型ライシメータにより計測した結果、人工軽量土は黒土と比較して、気温の高い時期に蒸発量が大きく、気温の低い時期に小さくなる傾向があることを報告している。

大濱⁴⁸⁾、香川⁴⁹⁾は、都市熱環境での芝生植栽の蒸発散に関する効果を明らかにするために、テストピースの温度、伝導熱流、土壌含水率の計測を行い、芝生が存在することで緩やかな含水率変動を示すことを明らかにした。

この他にも、屋上緑化に関しては、すでに民間部門においても、技術開発や普及が進んでいる段階にあり、そのヒートアイランド緩和効果に関しても、実験・実測に基づくデータや資料が蓄積されつつある。

3.2 壁面緑化

壁面緑化に使用されている植物を対象とした蒸散効果の評価としては、野島⁵⁰⁾の蒸散速度の計測による蒸散量推定の試みや、萩島⁵¹⁾の行った SAT 計を用いた実験による蒸散量測定、三坂⁵²⁾、鈴木⁵³⁾による重量法を用いた測定等が挙げられる。

野島⁵⁰⁾は、地表面、屋上、壁面における緑被の分布、植物の種類、密度の違いごとに単位面積あたりの葉面からの蒸散速度の計測を行い、受光量と大気飽差から近似式を用いた結果、蒸散量を推計することが可能であるとした。また、萩島⁵¹⁾は、ブルーパシフィックを用いたパネル型緑化システムについて、SAT 計法による緑化表面の熱収支を検討し、潜熱フラックスを同定している。

一方、三坂⁵²⁾、鈴木⁵³⁾は、アメリカツルマサキを用いたパネル緑化材からの蒸発散量を重量法により計測し、計測値から潜熱フラックスを算出して、壁面緑化による建物外部温熱環境への顕熱の低減効果について定量的な検討を行い、潜熱フラックスと正味放射量との間には正の相関が認められ、緑化パネル材からの蒸発散量による潜熱フラックスは正味放射量の増加分の約 60% を占めたことを報告している。

さらに鈴木⁵⁴⁾は、ヘデラヘリックスとアメリカツルマサキについて蒸発散量の計測値を元に、萩島⁵¹⁾の行った SAT 計法を用いて対流熱伝達率と物質伝達率を得て、重量法により計測した蒸発散量の実測値との比から蒸発効率を算出している。

以上の結果から、屋上緑化における蒸発散作用の温熱効果に関する既往の研究については多数の報告例があるのに対して、壁面緑化に使用されている植物を対象とした蒸散効果の評価としては、野島⁵⁰⁾の蒸散速度の計測による蒸散量推定の試みや、萩島⁵¹⁾の行った SAT 計を用いた実験による蒸散量推定、鈴木⁵³⁾の重量法による測定例等があるものの、実測に基づく実証的なデータの蓄積は十分とは言えない。今後、緑化の形態や植物種の違い等を考慮した基礎的なデータに基づく実証的な検証をさらに進めていく必要がある。

4. 建物物緑化による温熱環境シミュレーションに関する既往研究

近年のパソコンにおける計算機能力の向上により、都市～建築空間での温熱環境シミュレーション解析については、多数の研究例が蓄積されつつある。

村上⁵⁵⁾、金⁵⁶⁾は、メソスケールモデルを用いた数値解析により、関東地方を対象に土地利用形態による温熱環境の予測を行っている。ただし、水平方向のグリッドサイズは 500 m～8 km となっているため、建物や道路などの粗度要素を精緻に計算モデル上には解像できない。ヴタンカ⁵⁷⁾も、都市気候予測システム (UCSS) の開発を行い、キャノピーモデルを用いて数値解析を行っているものの、やはり格子解像度は数十 km 四方であるため、屋上・壁面緑化が温熱環境にもたらす改善効果を精緻に定量化することは難しい。

梅干野⁵⁸⁾は、顕熱流量指標としてのヒートアイランドポテンシャル (HIP) の算出法及び街区モデルでの適用例を提示し、住宅地・工場モデル、商業業務地などにおける緑化の効果の差異をシミュレーションで得られた HIP と関連づけて議論している。

同じく、伊⁵⁹⁾は、都市域における緑化程度の熱環境への影響を明らかにするため、樹冠の日射遮蔽量により七つの樹冠モデルを設定、都市街区の中から 8 街区を設定し、各街区を最大限緑化した場合、現状、緑化なしの三つの緑化モデルについて、全表面温度の分布図を作成して HIP を算出し、緑被との関係を分析した結果、緑化により最大約 4 の HIP の軽減効果が現れ、日中の HIP は緑被率よりも樹冠により形成される日陰の面積に直接関連する樹冠の体積率と強い負の相関があることを明らかにしている。

一方、外部空間における温熱評価を行うための設計支援を意図した研究例として、浅野⁶⁰⁾は赤外線放射カメラを用いた熱環境評価への総合的な応用を可能とするために、3次元熱画像の作成方法を開発した。また、山村⁶¹⁻⁶²⁾は、3D-CAD を用いた形状入力、メッシュを用いた計算方法、結果のグラフィック表現方法等の採用により多様な視点と時系列的に評価可能な設計実務レベルでの空間デザインの扱いに整合した予測評価システムを構築した。

萩島⁶³⁻⁶⁴⁾は、都市高温化要因の定量化を目的とし、改良建築-都市土壌連成系モデルを構築するため、同一形状の立方体建物が等間隔に並んだ都市モデルを対象として、熱負荷について解析を行っている。陳⁶⁵⁾は、一辺 9 m の立方体を建物として 4 棟配置した均等街区モデルを対象として、標準型 k-モデルを基本に、乱流熱フラックスの評価に WET モデルを導入し、建物風上側に改良 Launder-Kato モデルを組み込んだ改良モデルを使用して、建物外表面全てを緑化した場合と屋上面のみ緑化した場合が屋外空間の温熱快適性に及ぼす影響を検討した結果、全面緑化では風速低下、気温低下、相対湿度の上昇が見られ、屋上のみでは風速増加、気温上昇、相対湿度の低下が見られたとしている。吉田⁶⁶⁾は、簡易街区モデルにおいて、建物屋上と地上部の各々を芝生で

緑化した場合の屋外温熱環境に及ぼす影響について数値計算を行った結果、屋上緑化や地上緑化により風下側の建物周辺でわずかに低温となること、SET*による評価では地上緑化の方が屋上緑化に比べて効果の高いことを報告している。

同じく吉田ら⁶⁷⁻⁶⁸⁾は、建物数棟により構成された街区モデルを対象に対流・放射・湿気の連成解析を行い、草地や樹木の有無による温熱環境への影響をMRT(平均放射温度)やSET*(標準有効温度)により評価している。その結果、緑地率の増大に伴い、多くの領域でSET*が低下することを示している。また、樹木の効果については、大幅な気温の低下をもたらすが、過度の風速低下、湿度上昇が引き起こされ、かえって温熱環境については悪化すると報告している。解析の対象とした街区モデルは立方体の建物を均等配置した架空の簡易街区モデルであり、都市の地表面形態の特徴を再現したモデルとはなっていない。

伊藤ら⁶⁹⁾は、基本的な方形市街地をモデルとして緑化の有無や建蔽率の差が屋外温熱環境に与える影響を検討するため、気流解析はSIMPLE法、乱流モデルはk-モデルを使用してシミュレーション解析した結果、地表面及び建物周辺の緑化はオープンスペースが広く放射環境が劣悪な環境で有効であること、屋外環境の評価は風環境や放射環境を総合的に判断する必要のあることを指摘している。

実際の都市の地表面形態は、各種の形状の建物や構造物、道路等により複雑な様相を呈している。建物モデルを規則的に配列した簡易形状の街区モデルにおいて、建物モデルの高さや配列形態を変えた場合でさえ、その街区形状のパターンに応じて異なる乱流構造が形成されることが知られている⁷⁰⁾。また、天空率・通風率の変化により気流・温熱環境に対しても影響を与え⁷¹⁾、地表面被覆状況の変化が気流・温度場にも影響を及ぼす。このため、都市の温熱環境の効果的な改善を目指すためには、対象とする実在街区の地表面被覆状況を忠実に再現して、気流・温度・湿度の相互の関係を連成し、定量的に評価できるCFD解析による予測モデルが有効と考えられる⁷²⁾。

建物の配置・形状を考慮した街区のCFD解析例として、大黒ら⁷³⁾、森川ら⁷⁴⁾は、河川に接する集合住宅計画地を対象として、高反射塗装や壁面緑化が屋外の温熱環境に及ぼす影響について解析している。また、Huangら⁷⁵⁾は新宿を対象に屋外温熱環境を予測評価するため、k-モデルを用いて新宿地域での風速・気温・湿度・SET*(標準有効温度)の空間分布について解析を行っているものの、建築物緑化による温熱環境の改善効果についての解析は十分とは言えない。

鈴木ら⁷⁶⁾は、東京都心部の実在街区をモデルとして緑化なしの状態に対して、敷地内の地表面と屋上の20%を緑化し、外周を樹木で緑化した場合とさらに建物壁面の南西面を30mまでを緑化した場合について、CFD解析を行い、風向・風速・温度・湿度の解析値を元にSET*を指標として評価した結果、緑化なしに比べて、屋上や壁面を緑化することにより、最大で2℃低減することを報告し、簡易な計測により推計値の妥当性を検証している⁷⁷⁾。さらに、鈴木ら⁷⁸⁾

は、解析の対象スケールを街区スケールから地区スケールに拡大して、東京の霞ヶ関地区をモデルとして、緑化なしの状態に対して、街区内の地表面全面を芝生緑化するとともに建物屋上面の20%を芝生緑化した場合等についてCFD解析を行った結果を下に、地区内の顕熱総負荷量を計算した結果、緑化なしに対して地表面等を芝生緑化することにより、約24%の負荷量が低減したことを報告している。

一方、街区～建築敷地レベルでの樹木による温熱環境効果を実測、モデル推計した研究例として、香川ら⁷⁹⁾は、樹木のある街路空間の熱環境予測を目的として、単木樹の熱特性について実測した結果、樹木周辺に設置したグローブ温度計の実測値と計算値の一致から、葉表面の温度が推定可能であれば樹木周辺の熱環境予測も可能であることを報告している。

下川ら⁸⁰⁾は、赤外放射カメラによる熱画像データを用いて、樹冠部の表面温度分布特性、平均表面温度について検討するため、気温、日射量、風速を説明変数とした樹冠部平均表面温度の重回帰式を導出し、種々の樹木への適用可能性等を示した。

吉田ら⁶⁸⁾は、CFD解析により立方体均等配置モデルを対象に、樹高6.0m、樹冠直径4.0mの樹木を地盤全面に与え、温熱環境への影響を調べた。樹木の流体力学効果についてはk-モデルの基礎方程式に抗力項を加え、樹木による放射減衰効果については減衰関数を用いて日射遮蔽の効果を再現し、短波・長波放射、顕熱、潜熱を考慮して樹冠を構成する葉表面上での熱収支式を解いている。その結果、樹木を配置した場合、樹木がない場合に比べ、気温・MRT低下がもたらされるが、同時に風速低下、湿度上昇が生じ、SET*は上昇することを指摘した。

加藤ら⁸¹⁾は、模型樹木を対象にした風洞実験結果に基づき、k-モデルの基礎方程式に関わる適切なモデル化の方法、モデル係数の最適値の範囲などの検討を行っている。

片岡ら⁸²⁾は、樹木のモデル化を行い、葉面積密度や抵抗係数の値が単体樹木周辺の風速分布に与える影響について検討した。その結果、樹冠中央より上空では風速分布に各パラメータの影響は見られないが、地上付近では抵抗係数や葉面積密度に比例して防風効果が現れた。

下條ら⁸³⁾は、全天日射計、魚眼レンズを用いて測定された日射透過率、天空率による樹冠の葉面積密度、光学的深さによる推定方法に基づき、樹冠の放射減衰に関わるパラメータ(葉面積密度×消散係数)の同定を試みている。

大岡ら⁸⁴⁾は、街路樹について、直径が等しい球形をした樹冠が同じ高さで等間隔に並んでいるモデルを想定して、街路を歩行する人体を対象に熱環境の調整効果を試算した結果、街路樹がある場合は、樹冠の透過率が0.4でも、街路樹がない場合に比べると、SET*で3~4℃の低下し、温冷感の9段階評価のランク1の減少が見られたとしている。

大橋⁸⁵⁾は、モデル比較・検証のためのデータ取得のために実物の樹木を対象にした風洞実験を行い、風環境に対する樹木の影響を数値シミュレーションによって検討し、これまでの樹木モデルの改良点について検討を加え、単独の樹木に適

したモデルを提案している。

岩田⁸⁶⁾は、街路空間における温熱・空気環境が植栽状況の違いにより受ける影響を数値解析により検討した。樹木については、樹高 12.7 m (そのうち樹冠は 2.7 m)、形状は球形型・逆四角錐としている。樹木のない場合、街路内の循環流の影響により熱の移流による歩行者空間への移動量が大きい。また、樹冠の形が逆四角錐の場合、球形に比べて風速低減効果が小さく、移流による熱の輸送量が大きくなり、樹冠形状が熱の輸送メカニズムに与える影響は大きいことを報告している。

坂本⁸⁷⁻⁸⁸⁾は、樹木近傍で蒸散や日射遮蔽による局所的に相対的な低温域ができるクールスポット効果に着目し、樹木の伝熱学的作用に関する計算モデルとして「樹木モデル」を構築し、CFD の計算体系に組み込むためにシミュレーションツールとしての検討を行い、標準気象データにある物理量の関数としてクールスポット効果を近似的に予測できることを報告している。

茶谷⁸⁹⁾は、街路樹による街路空間への蓄熱軽減効果について、実測と数値モデルでの比較検討の結果、街路樹があることで、日中の日射遮蔽効果により街路空間への蓄熱が抑制され、夜間においてもその効果が持続していることを示した。

以上のことから、建築～都市空間において建築物緑化による温熱環境シミュレーションを行い、今後さらなる技術開発と普及を促進するためには、緑化によるヒートアイランド緩和効果について、定量的にシミュレーション評価できる基礎的データの蓄積が実証性を高めていく上からも必要であると考えられる。上述したとおり壁面緑化の放射収支や蒸発潜熱による温熱環境改善効果については、実測により検証した研究例はほとんど見られず、シミュレーションの予測精度を高めていく上で基礎的データの蓄積は必要不可欠と考えられる。

引用文献

- 1) 鈴木弘孝・小島隆矢・嶋田俊平・野島義照・田代順孝 (2005) 壁面緑化に関する技術開発の動向と課題, 日本緑化工学会誌 31(2), 247-259.
- 2) 梅干野晃・萩原賢二 (1983) 屋上の芝生植栽による照り返し防止・焼け込み防止効果, 日本建築学会建築環境工学論文集, 133-140.
- 3) 野島他 (1994) つる植物の被覆がコンクリート建物の壁面温度に及ぼす効果, 千葉大学園芸学部報第 48 号.
- 4) 梅田和彦・森川泰成・深尾仁 (2003) 屋上芝生植栽の熱環境改善効果に関する研究 (芝生植栽の熱挙動の実験的検討), 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集【2003.9.17~19 (松江)】.
- 5) 峰村大輔・山田宏之・山本幹雄・中尾史郎・中島敦司・養父志乃夫 (2002) 屋上緑化による建築物に対する熱負荷の軽減効果についての実証的研究, 環境システム研究論文集 vol. 30, 277-283.
- 6) 山田宏之・養父志乃夫・中島敦司・中尾史郎 (2004) 屋上緑化による熱遮蔽効果の解析, ランドスケープ研究 67(5), 453-456.
- 7) 山田宏之・露木博視・石川嘉崇・中島敦司・中尾史郎・養父志乃夫 (2005) 木造住宅の緑化された屋根による屋内温熱環境への影響解析, ランドスケープ研究 68(5), 893-896.
- 8) 山本奈美・川島茂人・村上暁信・渡辺達三 (2004) 軽量薄層型屋上緑化システムにおけるヒートアイランド緩和効果, ランドスケープ研究 67(5), 443-446.
- 9) 萩島理・成田健一・谷本潤・三坂育正・松島篤・尾之上真弓 (2004) 大規模な階段状緑化屋根を有する建築物周辺の微気象に関する実測調査, 日本建築学会計画系論文集 577, 47-54.
- 10) 尾之上真弓・成田健一・三坂育正・鈴木義則・吉越互 (2001) ステップガーデンを有する建築周辺の温熱環境実測評価 (その 1 測定概要と建物近傍における気流特性), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 725-726.
- 11) 三坂育正・成田健一・尾之上真弓・鈴木義則・吉越互 (2001) ステップガーデンを有する建築周辺の温熱環境実測評価 (その 2 熱収支の解析結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 727-728.
- 12) 中西大輔・町村尚 (2002) 灌水による屋上緑化植物の表面温度と熱収支の変化に関する実験研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 123-124.
- 13) 山本耕三・安田正雪 (2002) 屋上緑化による温熱環境改善効果, 東洋建設技術研究報告, 29, 73-76.
- 14) 佐俣満夫・梅田てるみ (2003) ヒートアイランド対策としての屋上緑化の温度低減効果調査, 横浜市環境科学研究所報, 第 27 号, 64-68.
- 15) 角田孝行・垣鍔直・溝口忠・雨海清一郎 (2002) 緑化屋根の熱的性能評価 (その 2) 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 119-120.
- 16) 足永靖信 (1997) 屋外空間における短波及び長波の放射強度の分布に関する実測, 日本建築学会計画系論文集, 71-77.
- 17) 浦野明・稲井康弘・花木啓祐 (2001) 街区の放熱・熱負荷連成解析 (屋上緑化・街路樹による空調消費エネルギーの削減効果の定量化), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 733-734.
- 18) 吉田伸治・原山和也・大岡龍三・村上周三 (2002) NCR 01 を利用した屋上緑化・地上緑化の効果の検討 (屋外温熱環境形成寄与率 CRO に関する研究 その 4) 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 927-928.
- 19) 梅干野晃・山下富大 (1983) ベランダ植栽による日射遮へい効果 (植栽の建築環境に及ぼす省エネルギー効果 その 3): 日本建築学会九州支部研究報告, 133-136.
- 20) 梅干野晃・山下富大 (1983) つる植物によるベランダ植栽の日射遮へい効果に関する実験研究: 日本建築学会建築環境工学論文集, 141-146.
- 21) 梅干野晃・山下富大 (1981) ツル植物による植栽スクリーンの日射遮へい効果, 日射透過率と表面温度について, 日本建築学会建築環境工学論文集, 141-146.
- 22) 梅干野晃・茶谷正洋・八木幸二 (1985) ツタの西日遮へい効果に関する実験研究: 日本建築学会計画系論文報告集, 11-17.
- 23) 沖中健・野島義照・小林達明・瀬戸祐直 (1994) つる植物の被覆がコンクリート建物の壁面温度に及ぼす効果: 千葉大学園芸学部報第 48 号, 125-134.
- 24) 野島義照・沖中健・小林達明・坊垣和明・瀬戸祐直・倉山千春 (1993) 壁面緑化による建築物の壁面温度の上昇抑止効果の実証的研究, 造園雑誌, 56(5), 115-120.
- 25) 野島義照・鈴木弘孝 (2004) 壁面緑化による夏季の壁面から屋内への熱流および熱流量の軽減効果, ランドスケープ研究 67(5), 447-452.

- 26) 伴資政・坂本雄三・寿浦光晴(2001)シミュレーションによる壁面緑化の熱的效果の研究:日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 43-44.
- 27) 近藤三雄・鈴木誠孝(1983)表面温度からみた都市植生の存在効果に関する実証的研究:造園雑誌 47(1), 1-15.
- 28) 高尾京子・谷本潤・萩島理(2003)ヒートアイランドのパスシブコントロール手法としての軽量壁面緑化コケパネルの開発 新しい基盤材の検討及び熱特性の把握:空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集.
- 29) 渋谷圭助・佐藤澄仁(2004)パネル設置型および下垂型壁面緑化における温熱環境評価:日本緑化工学会誌, 30(1), 211-214.
- 30) 鈴木弘孝・三坂育正・村野直康・田代順孝(2005)壁面緑化による建物外部の温熱環境改善効果に関する研究, ランドスケープ研究 68(5), 503-508.
- 31) 鈴木弘孝・三坂育正・水谷敦司・田代順孝(2006) WBGT, SET*による壁面緑化の温熱環境改善効果の評価, ランドスケープ研究 69(5), 441-446.
- 32) 野島義照・長谷川秀三(1995)夏季における各種造園植物の葉面からの蒸散量, ランドスケープ研究, 58(5), 97-100.
- 33) 野島義照・沖中健・瀬戸裕直・倉山千春・二階堂稔・高砂裕之(1998)屋上緑化による夏の建築物および都市の熱負荷の軽減効果の実証的研究.日本緑化工学会誌, 20(3), 168-176.
- 34) 三小田憲司・小宮英孝・塩田耕三・杉本英夫(1993)屋上芝生植栽の導入効果に関する実験研究, 日本建築学会学術講演梗概集(関東), 1525-1526.
- 35) 谷本潤・片山忠久・林徹夫・木村健一(1996)屋上被土からの蒸発量の簡易計算手法に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集(近畿), 129-130.
- 36) 加藤泰子・山本聡・石田均・前中久行(2001)土壌水分及び日射量測定に基づく薄層土壌の必要保水量について, ランドスケープ研究 64(5), 541-544.
- 37) 中山敬一・深山陽子・于貴瑞・藤井英二郎・松岡延浩・今久(1997)コンテナ植栽幼木からの蒸発散量の予測に関する研究.ランドスケープ研究, 60(3), 277-280.
- 38) 壽浦光晴・坂本雄三・工藤善(2002)都市緑化の評価を目的とした常緑低木植栽の蒸散量推定モデルに関する研究.日本建築学会計画系論文集, 559, 15-19.
- 39) 恩村定幸・松本衛・銚井修一(1993)屋上芝生植栽による蒸発冷却効果に関する研究(その2 風洞実験と解析), 日本建築学会学術講演梗概集(関東), 1531-1532.
- 40) 王革・梅干野晃・何江・堀口剛(1993)屋上芝生植栽の熱的特性に関する実験研究(その9 水収支特性に関するデータ解析), 日本建築学会学術講演梗概集, 1527-1528.
- 41) 何江・王革・梅干野晃・王革・堀口剛(1993)屋上芝生植栽の熱的特性に関する実験研究(その10 芝生の電熱モデルについて), 日本建築学会学術講演梗概集, 1529-1530.
- 42) 山口隆子・横山仁・石井康一郎(2005)軽量薄層型屋上緑化システムにおけるヒートアイランド緩和効果.ランドスケープ研究, 68(5), 509-512.
- 43) 三坂育正・成田健一(2000)緑化による屋外熱環境の緩和に関する研究 その1 草地における熱収支特性の実測評価, 日本建築学会学術講演梗概集(東北), 615-616.
- 44) 三坂育正・成田健一(2002)緑化による屋外熱環境の緩和に関する研究(その2):日本建築学会大会梗概集, 677-678.
- 45) 大野朋子・山本聡・前中久行(2006)メキシコマンネングサおよび芝生薄層緑化からの蒸発散量, ランドスケープ研究 69(5), 431-436.
- 46) 大野朋子・前中久行(2006)蒸発散量と分光反射特性からみた薄層緑化におけるメキシコマンネングサとヒメコウライシバ, 裸地の温度緩和効果, 日本緑化工学会誌 32(1), 86-91.
- 47) 小野芳・柳雅之・工藤善・手代木純・奥水肇(2006)屋上緑化における植物の蒸発散量, 日本緑化工学会誌 32(1), 74-79.
- 48) 大濱淳司・片山忠久・林徹夫・谷本潤・何平・香川治美(1996)芝生植栽が都市の熱環境に及ぼす影響に関する実験的研究(その1 実験の方法及び概要)日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 135-136.
- 49) 香川治美・片山忠久・林徹夫・谷本潤・何平・大濱淳司(1996)芝生植栽が都市の熱環境に及ぼす影響に関する実験的研究(その2 芝生植栽の蒸発散特性)日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 137-138.
- 50) 野島義照(1998)都市における植生からの蒸散による夏の温熱環境改善力に関する研究 京都大学学位論文, 181 pp.
- 51) 萩島理・谷本潤・高尾京子(2005)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, 22, 253-258.
- 52) 三坂育正・鈴木弘孝・藤崎健一郎・成田健一・田代順孝(2005)壁面緑化植物の蒸散作用による温熱環境改善効果, 環境情報科学論文集 19, 113-116.
- 53) 鈴木弘孝・三坂育正・田代順孝(2006)蒸発散量の計測によるパネル型壁面緑化の温熱環境改善効果, 日本緑化工学会誌 32(1), 80-85.
- 54) 鈴木弘孝・三坂育正・田代順孝(2007)蒸発効率を指標とした壁面緑化の蒸発特性, ランドスケープ研究 70(5), 401-406.
- 55) 村上周三, 持田灯, 金相璵, 大岡龍三(1997)関東地方における土地利用状況の変化と流れ場・温度場の関係, 日本建築学会計画系論文集, 491, 31-39.
- 56) 金相璵, 村上周三, 持田灯, 大岡龍三, 吉田伸治(2000)数値気候モデルによる都市化がもたらす関東地方の気候変化のメカニズムの解析, 日本建築学会計画系論文集, 534, 83-88.
- 57) ヴタンカ, 足永靖信, 浅枝隆(2000)都市大気境界層の乱流モデリング都市建築計画における都市気候予測システムの開発 その1, 日本建築学会計画系論文集, 536, 95-99.
- 58) 梅干野晃, 浅輪貴史, 高田真人, 円井基史(2002)土地利用と熱環境対策から見た都市街区におけるヒートアイランドポテンシャルの特徴, 日本建築学会計画系論文集, 559, 63-70.
- 59) 尹敦奎, 梅干野晃(1999)熱収支数値シミュレーションによる都市緑化の評価, 日本建築学会計画系論文集, 520, 69-75.
- 60) 浅野耕一・梅干野晃・山田貴代・松永徹志(1998)建築外部空間における熱環境解析のための3次元熱画像の作成方法, 日本建築学会計画系論文集, 35-41.
- 61) 山村真司, 梅干野晃, 浅輪貴史(2002a)建築外部空間デザインの設計支援を目的とした熱放射環境の予測手法の開発, 日本建築学会計画系論文集, 554, 85-92.
- 62) 山村真司, 梅干野晃, 浅輪貴史(2002b)建築外部空間デザインの設計支援を目的とした熱収支・気流連成シミュレーション手法開発の基礎的研究, 日本建築学会計画系論文集, 560, 73-80.
- 63) 萩島理, 谷本潤, 片山忠久, 大原健志(2001)改良・建築-都市-土壌連成系(AUSSSM)モデルによる都市高温化要因の構造解析第1報 モデルの理論構成および標準解, 日

- 本建築学会計画系論文集, 550, 79-86.
- 64) 萩島理, 谷本潤, 片山忠久, 大原健志 (2002) 改良・建築-都市-土壌連成系 (AUSSSM) モデルによる都市高温化要因の構造解析第2報 数値実験による都市高温化要因の定量化, 日本建築学会計画系論文集, 553, 91-98.
 - 65) 陳宏, 大岡龍三, 原山和也, 村上周三, 吉田伸治 (2002) 対流・放射連成解析による建物表面緑化の屋外環境緩和効果の検討, 生産研究, 54(1)(2), 84-88.
 - 66) 吉田伸治, 原山和也, 大岡龍三, 村上周三 (2002) NCR 01 を利用した屋上緑化・地上緑化の効果の検討 (屋外温熱環境形成寄与率 CRO に関する研究 その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 927-928.
 - 67) 吉田伸治, 村上周三, 持田灯, 大岡龍三, 富永禎秀, 金相雄 (2000 a) 対流・放射・湿気輸送を連成した屋外環境解析に基づく緑化の効果の分析, 日本建築学会計画系論文集, 529, 77-84.
 - 68) 吉田伸治, 大岡龍三, 持田灯, 富永禎秀, 村上周三 (2000 b) 樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外温熱環境緩和効果の検討, 日本建築学会計画系論文集, 536, 87-94.
 - 69) 伊藤宏, 洞田浩文, 森川泰成, 西村正和 (1996) 屋外環境計画手法に関する研究 その4 市街地における緑化効果の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), 957-958.
 - 70) 萩島理, 片山忠久, 谷本潤, 森竹千景, 江副紀子 (2000) 高さの異なる直方体模型群の周辺気流特性に関する風洞実験, 日本建築学会計画系論文集, 538, 15-22.
 - 71) 吉田伸治, 村上周三, 大岡龍三, 原山和也 (2000 c) 街区形状の変化が屋外風系と温熱環境に及ぼす影響の数値解析, 第16回日本風工学シンポジウム, 119-124.
 - 72) 村上周三 (2000) CFD による建築・都市の環境設計工学, 東京大学出版会, 東京, 443 pp.
 - 73) 大黒雅之, 村上周三, 森川泰成, 持田灯, 足永靖信, 大岡龍三, 吉田伸治 (2003) 住宅団地を対象とした各種屋外温熱環境改善効果に関する CFD 解析 (その1) 計算概要および壁面・屋根面の高反射塗装の効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), 621-622.
 - 74) 森川泰成, 村上周三, 持田灯, 足永靖信, 大岡龍三, 吉田伸治, 大黒雅之 (2003) 住宅団地を対象とした各種屋外温熱環境改善効果に関する CFD 解析 (その2) 舗装面の高反射塗装および壁面緑化の効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), 623-624.
 - 75) Hong Huang, Ryoza Ooka, Shinsuke Kato (2005) Urban thermal environment measurements and numerical simulation for an actual complex urban area covering a large district heating and cooling system in summer, Atmospheric Environment, 39, 6362-6375.
 - 76) 鈴木弘孝・阪田升・中山浩成・田代順孝 (2007) CFD 解析を用いた建物緑化による温熱環境改善効果シミュレーション, 環境情報科学 35(4), 54-65.
 - 77) 鈴木弘孝・中山浩成・田代順孝 (2007) 建物緑化の違いが街区内の気温と湿度の分布に与える影響に関する数値解析, 日本緑化工学会誌 33(1), 158-163.
 - 78) 鈴木弘孝・吉川淳一郎 (2008) 建築敷地緑化の違いが街区内の気温と湿度の分布に与える影響に関する数値解析, 日本緑化工学会誌 34(1), 97-102.
 - 79) 香川治美, 片山忠久, 林徹夫, 崔棟告, 萩島理, 池沢紀幸 (1995) 樹木のある街路の熱環境予測 (その1) 単木樹の熱特性に関する実態調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), 613-614.
 - 80) 下川幸司, 片山忠久, 林徹夫, 谷本潤, 何平, 池沢紀幸 (1996) 樹木のある街路の熱環境予測 (その5) 実測に基づく樹冠部熱特性に関する検討日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), 131-132.
 - 81) 加藤敦子, 持田灯, 吉野博, 村上周三 (2001) 植生 Canopy モデルを組み込んだ k-モデルによる単独樹木周辺の風速分布の予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 929-930.
 - 82) 片岡浩人, 木梨智子, 川口彰久 (2002) 風環境シミュレータ「Zephyrus (ゼフィルス)」の開発, 大林組技術研究所報, 64.
 - 83) 下條正貴, 吉田伸治, 大岡龍三 (2003) 街路樹による暑熱環境緩和効果に関する研究 (その3) 街路樹の樹冠についての光学的深さ, 葉面積密度, 入射角度特性の実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), 609-610.
 - 84) 大岡龍三, 中村泰人, 平岡久司 (1989) 街路樹の歩行者の暑熱環境に及ぼす効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), 859-860.
 - 85) 大橋征幹 (2004) 単独樹木周辺の気流解析に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 578, 91-96.
 - 86) 岩田達明, 持田灯, 吉野博, 佐々木澄, 幡谷尚子 (2005) 仙台市中心部の植栽計画のための街路空間の熱・空気環境の数値解析 (その4) 植栽状況の違いによる街区内熱収支・汚染ガス収支構造の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 695-696.
 - 87) 坂本雄三, 小島悦史, 足永靖信, 今野雅 (2005) CFD を利用した樹木のクールスポット効果の数値解析 その1 樹木における放射と蒸散に関する計算モデル, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 689-690.
 - 88) 小島悦史, 坂本雄三, 足永靖信, 今野雅 (2005) CFD を利用した樹木のクールスポット効果の数値解析 その2 クールスポット効果のケーススタディ, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 691-692.
 - 89) 茶谷真幸, 竹林英樹, 森山正和 (2003) 街路樹の日射遮蔽による街路空間の蓄熱防止効果に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), 607-608.

(2008. 9. 30 受理)