

研究速報

# 対流・放射・湿気輸送連成解析による緑地の温熱環境緩和効果の検討

Effect of Greening on Outdoor Thermal Environment with Coupled Simulation of CFD, Radiation and Moisture Transport

吉田 伸治\*・村上 周三\*・持田 灯\*\*・大岡 龍三\*\*\*・富永 禎秀\*\*\*\*  
Shinji YOSHIDA, Shuzo MURAKAMI, Akashi MOCHIDA, Ryoza OOKA and Yoshihide TOMINAGA

## 1. はじめに

近年、樹木、草地等の緑地面積を増加させることにより、夏季の屋外の温熱環境を緩和しようとする建築・都市計画が種々提案されている。しかし、草地と樹木では温熱環境に関わる各物理要素（風速、気温、放射、湿度）に与える影響は全く異なる。特に樹木の植栽は風速低減、湿度上昇を引き起こし温熱環境をかえって悪化させる方向に働く場合もある。従って、緑化による温熱環境の緩和効果を適切に利用するためには、緑地の種類、規模の違いが温熱環境に与える影響を定量的に予測・評価する必要がある。本研究では、既報<sup>文1)</sup>で提案した3次元樹木モデル<sup>文1)</sup>を組み込んだ3次元対流・放射・湿気輸送連成解析手法<sup>文2)</sup>により、緑地の種類、規模の違いが温熱環境へ与える影響を検討する。

## 2. 3次元樹木モデルの概要

本樹木モデルでは既報<sup>文1)</sup>に基づき、以下に示す3つの樹木の環境緩和効果を組み込んだ。

- ①樹木の流体力学的影响（風速低下と乱れの増加）<sup>文3),4)</sup>
- ②樹木による放射減衰の効果<sup>文3),5)</sup>

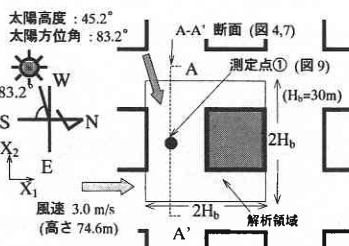


図1 解析領域

- ③樹木からの潜熱発生を含む熱収支の影響<sup>文3)</sup>
- 本樹木モデルの詳細は既報<sup>文1)</sup>を参照されたい。

## 3. 計算概要

### 3.1 街区モデル

図1に示す同一形状の立方体建物モデル（1辺30m）で構成される均等街区を想定した空間を対象とする。

### 3.2 気象条件（図1）

東京の7月23日午後3時の気象条件を対象とした。この時の太陽位置及び風向（高さ74.6m）を図1中に示す。

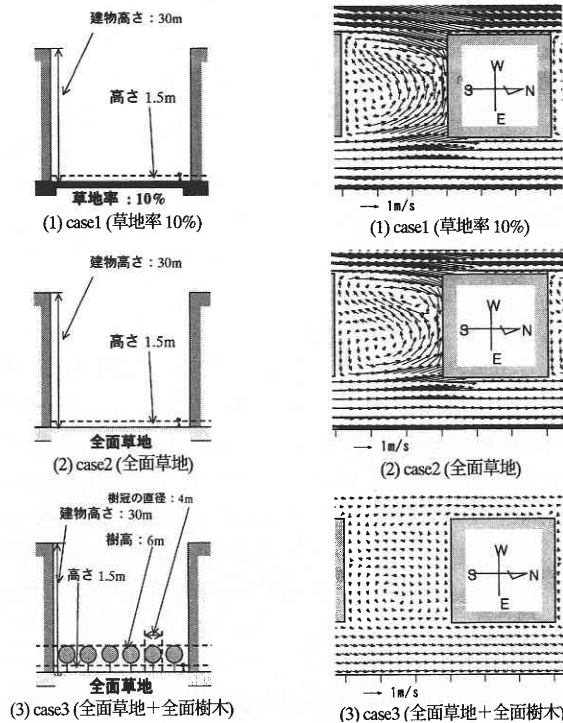


図2 計算ケース

図3 風速ベクトルの水平分布（高さ15m）

\*東京大学生産技術研究所 第5部  
 \*\*東北大学大学院工学系研究科  
 \*\*\*福井大学工学部建築建設工学科  
 \*\*\*\*新潟工科大学工学部建築学科

研 究 速 報

法線面直達日射量は 765 [W/m<sup>2</sup>], 水平面天空日射量は 136 [W/m<sup>2</sup>]. 外気温, 相対湿度は各々 31.6 [°C], 58 [%] (東京, 1989-1992 年の 7/23 午後 3 時の平均). 気象庁高さ (74.6 m) の風速は 3 m/s (東京 7 月, 1975-1990 年の平均).

3.3 計算ケース (図 2)

case 1 は地表面の 10% が草地に覆われたケースである<sup>注1)</sup>. これに対し case 2 は, 地表が全て草地に覆われた場合を想定している<sup>文2)</sup>. 更に, case 3 は case 2 の地表面上に地上 2 m より上部に直径 4 m の樹冠をもつ樹木を 5 m 毎に均等に配置したケースである (図 2 (3)). ここで樹冠の葉面積密度, 消散係数の値は実測結果<sup>文6)</sup>を参考に各々 1.0 [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>], 0.6 [-] とした<sup>注2)</sup>. 計算手法の詳細については既報<sup>文1), 2), 7)</sup>を参照.

4. 解 析 結 果

4.1 風速分布 (図 3, 4)

図 3 に高さ 1.5 m における風速ベクトルの水平分布を示す. 地表面全体が草地で覆われた場合を想定した case 2 と地表面の 10% が草地に覆われた場合を想定した case 1 の間には, 流れ場全体の傾向として大きな差は見られない. 一方, case 2 で想定した地表面の上に樹木を植栽した case 3 は case 2 に比べて全般に風速が低下する. これは樹木の風速低減効果によるものである. また, 図 4 に循環流域中央を東西に切断した A-A' 断面内 (表示位置は図 1 参照) における風速ベクトルの鉛直分布を示す. 3 ケース共, 鉛直方向への循環流が生じているが, case 1, case 2, case 3 の順番で循環流が強い. これらは後述する様に, case 2 は草地の増加, case 3 は草地の増加並びに樹木の植栽による気温の全般的な低下 (図 7) に伴い, 風速の鉛直成分の運動方程式中にある浮力項  $-g_3\beta < 0 >$  が減少したためである (図 4).

4.2 地表面温度分布 (図 5)

case 2 は, 草地の増加に伴う地表からの潜熱発生増加により, case 1 に比べ, 日照部で約 14°C, 日影部で約 6°C 地表面温度が低下する. 一方, case 3 は, 樹冠の日射減衰効果により, case 2 に比べて, 更に日照部で約 12°C, 日影部で約 2°C 地表面温度が低くなる. 又, このケースの場合, 全般に地表面温度が気温よりも低い値となる (図 5 (3)). 観測値との対応については注 3 を参照されたい.

4.3 気温分布 (図 6, 7)

図 6 に高さ 1.5 m における気温の水平分布を示す. また, 図 4 と同じ表示断面における気温の鉛直分布を図 7 に示す. case 2 は, case 1 に比べ, 循環流域内で約 0.5 ~

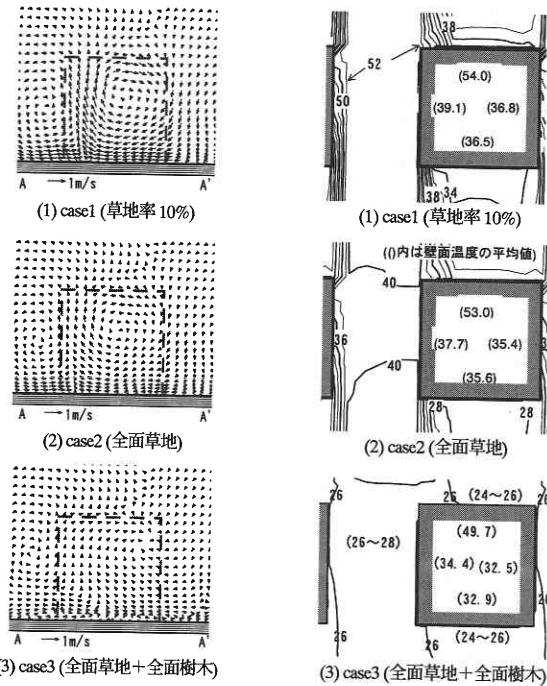


図 4 風速ベクトルの鉛直分布 (A-A'断面)

図 5 地表面温度分布 (単位: °C)

1.5°C 気温が低く, 草地からの蒸発散による気温低減効果が認められる. 一方, case 3 は case 2 に比べ, 更に約 2.0 ~ 5.5°C も温度が低下する (図 6 (3)). また, case 3 は地表近傍が約 28°C, 建物屋上高さ付近 (約 30 m) で約 31°C 程度の値を示しており, 地表近傍の気温が上空 (高さ 30 m) の気温よりも低い. これに対して case 1, case 2 では地表近傍が case 1 で約 34°C, case 2 で約 32°C, 屋上高さ付近は両ケース共に約 31°C と, case 3 とは逆に地表近傍の気温が上空の気温よりも高い値を示す (図 7). これは case 3 の地表面温度が気温よりも低いためと考えられる. case 1, case 2 では地表面温度が気温よりも高いため (図 5 (1), (2)), 地表近傍の大気を加熱し, 大気の状態が不安定となる. これに伴い, 鉛直方向への循環流 (図 4 (1)) が発生し, この循環流によって熱が建物の屋上高さ付近 (約 30 m) まで運ばれる (図 7 (1), (2)). 一方 case 3 は, 地表面温度が気温より低いため (図 5 (3)), 地表近傍の大気を冷却し, 大気の状態が安定となる. そのため鉛直方向への循環流も弱く, 冷気は地表近傍に滞留する. このため, case 3 の気温分布のパターンは case 1, case 2 とは逆の結果となる (図 7 (3)).

4.4 相対湿度分布 (図 8, 9)

図 8 に高さ 1.5 m における相対湿度の水平分布を示す. case 1 は 51 ~ 59% 程度, case 2 は 62 ~ 63% 程度, case 3 は 71 ~ 89% 程度の値を示しており, case 2 は case 1 よ

り3~8%程度, case 3はcase 2より10~20%程度も相対湿度が高い。また,循環流域中央の測定点①(表示位置は図1を参照)における絶対湿度の鉛直分布を図9に示す。ここでもcase 3が特に高湿度な値を示し,地表近傍では約92%の値となる。これは,草地,樹木からの水蒸気発生に伴う絶対湿度の上昇と気温低下(図7(3))の影響によるものである。

4.5 MRT分布(図10)

高さ1.5mにおけるMRTの水平分布を図10に示す。case 2はcase 1に比べ,地面からの潜熱発生増加に伴う地表面温度の低下により,全般に10°C程度MRTが低下する。一方,case 3はcase 2に比べて,日照部に配置した樹木の日射遮蔽効果により更に10°C程度MRTが低下する。

4.6 SET\*分布(図11, 12)

図11に高さ1.5mのSET\*の水平分布を示す。地表面の10%が草地に覆われている場合を想定したcase 1と地表面全面が草地で覆われている場合を想定したcase 2では日照部と日影部でSET\*の値に顕著な差が生じるのに対して,case 2の地表面上に樹木を植栽したcase 3では樹冠の放射減衰効果により,比較的均一なSET\*の値を示す。

次に,緑地の種類(草地,樹木)と面積の違いによるSET\*の変化(各ケースの差)を図12に示す。ここで図12(1)が,のcase 1(草地率10%)からcase 2(全面草

地)への草地面積の増加に伴うSET\*の増減(case 2 - case 1)を示し,図12(2)が草地のcase 2からcase 3(全面草地+全面樹木)へのSET\*の増減(case 3 - case 2)を示す。また,図中の灰色の部分(草地)の増加若しくは樹木の植栽に伴いSET\*が減少し,夏季の温熱環境が改善される領域であり,白色の部分(樹木)は逆にSET\*が増加し夏季の温熱環境が悪化する領域である。本解析では,草地の増加に伴い局所的にSET\*が増加する箇所も存在するが多くの領域においてSET\*は低下する(最高で約2°C,図12(1))。この局所的なSET\*の増加は風速低下,湿度上昇に起因するものである。一方,case 3はcase 2に比べ約3.0°CのSET\*の低下から最大約8.0°CものSET\*の上昇が見られ,草地の増加(case 1 → case 2)とは逆にSET\*の上昇する領域の方が,低下する領域よりも大きい(図12(2))。これも草地を増加した際に局所的に生じたSET\*の増加する領域と同様,樹木の配置に伴う風速の全般的な低下による影響が大きいためである。本計算では,草地の増加の場合(case 1 → case 2)も樹木の増加の場合(case 2 → case 3)も共に風速の増減がSET\*の値に大きな影響を及ぼす結果となったが,これは人体からの対流による顕熱放散と発汗に基づく潜熱放散が大幅に変化するためと考えられる。以上のように,Gaggeらの提唱したSET\*を利用して温熱感を評価した場合,風速は屋外における人体の温熱感に大きな影響を与え得ると言える。しかしながら屋外の温熱快適性の

の評価モデルはまだ確立された訳ではなく,今後更に検討する必要があると考えられる<sup>注4)</sup>。また,本解析のcase 3は,全面に樹木を配置し,最も大きな温熱環境緩和効果が期待されたケースであるが,樹木の量が多すぎて過度の風速低下と湿度上昇をもたらし,結果的には温熱環境を改善せず悪

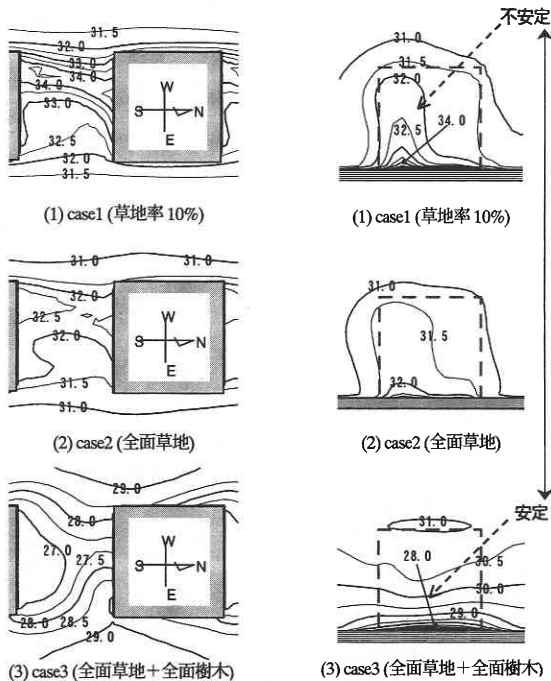


図6 気温の水平分布 (高さ1.5m, 単位: °C)

図7 気温の鉛直分布 (A-A'断面, 単位: °C)

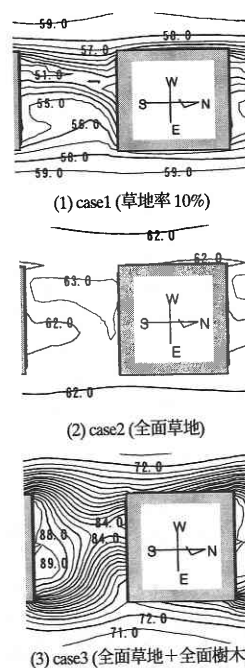


図8 相対湿度の水平分布 (高さ1.5m, 単位: %)

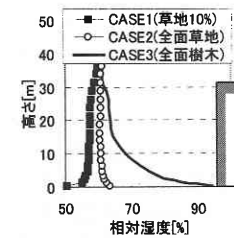


図9 相対湿度の鉛直分布 (測定点①)

研 究 速 報  
 化させるものとなった。しかしながら、適切な量の樹木の配置が良好な屋外温熱環境を提供することは間違い無い。今後、本解析手法を利用して適切な温熱環境緩和効果の得られる、最適な樹木の配置を検討していきたい。

5. ま と め

- (1) 環境緩和効果を総合的に組み込んだ樹木モデルを用いて、樹木の温熱環境緩和効果を検討した。
- (2) 草地面積の増加した case 2 では草地 10% の case 1 に比べて、気温低下、湿度上昇が見られ、SET\* は多くの領域で低下し温熱環境が改善される。
- (3) 樹木を配置した case 3 は case 2 に比べ、大幅な気温低下をもたらすが、同時に樹木による過度の風速低下、気温低下、湿度上昇を引き起こし、結果として SET\* が上昇し、かえって温熱環境が悪化する結果となった。これより、樹木の植栽が常に温熱環境を緩和するとは限らず、植栽による温熱環境緩和効果を利用する場合、樹木の適切な密度と配置を検討する必要があることが確認された。今後、環境緩和効果の大きな最適な樹木の配置に対する検討を行う予定である。

(1999 年 11 月 15 日受理)

注

- 1) ここで示す草地は芝生等の丈の低い緑地を想定し、その効果は地表面の蒸発効率  $\beta$  の増加に伴う潜熱による放熱の増加のみで評価した。即ち、今回は、粗度長、アルベドの値は全ケース共に同じ値を用いた。100% 草地の場合の  $\beta$  は文献 8 より 0.3 とした。
- 2) 文献 6 で示す実測結果では、樹木 (ニセアカシア) の樹冠の日射減衰率が約 90% であった。本計算では、これを基に樹木の葉面積密度、放射に関する葉群の消散係数を最適化し、各々の値を 1.0 [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ]、0.6 [-] とした。又、樹木の蒸発効率は 0.3 とした。
- 3) 文献 6 に示す実測と同じ対象で行った本年 8 月 4 日 (晴天) の午後 2 時 30 分の熱電対による地表面温度の測定では、アスファルト日照部で約 46 [ $^{\circ}\text{C}$ ]、草地日照部で約 37 [ $^{\circ}\text{C}$ ]、草地緑陰部で約 29 [ $^{\circ}\text{C}$ ] の値を示した。一方、本解析では、case 1 (緑地 10%) の日照部で約 52 [ $^{\circ}\text{C}$ ]、case 2 (全面草地) の日照部で約 40 [ $^{\circ}\text{C}$ ]、地表全面が日影となる case 3 (全面樹木) では、約 27 [ $^{\circ}\text{C}$ ] の値を示している。本計算結果は、この実測と対象建物や、検討時刻等は異なるものの、温度の絶対値や場所による差異の傾向は良い対応を示している。この件については、今後更なる実測を行って検討を続け、数値予測の精度を高めていく予定である。
- 4) 室内気候の評価に対して開発された SET\* をそのまま屋外環境に対して適用することについて問題がない訳ではないが、現状では他に適当な指標が無く、本研究ではこの SET\* を屋外温熱快適性の評価のために準用するという立場を取る。これについては今後詳しい検討を行う予定である。

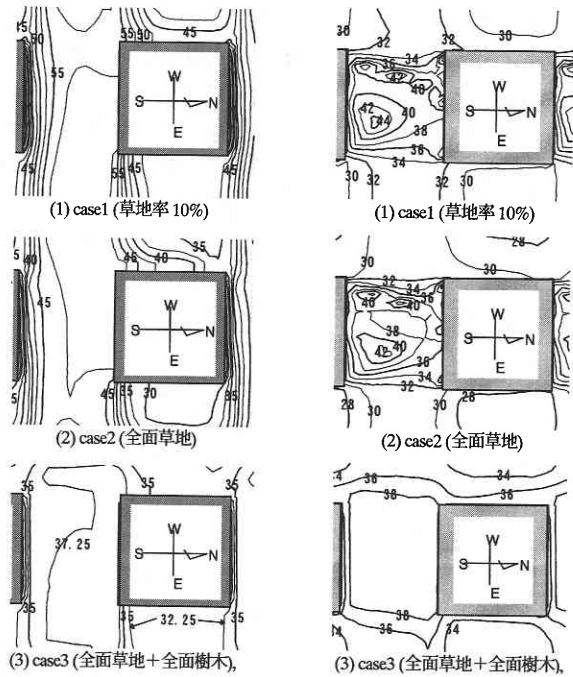


図 10 MRT の水平分布 (高さ 1.5 m, 単位:  $^{\circ}\text{C}$ )

図 11 SET\* の水平分布 (高さ 1.5 m, 単位:  $^{\circ}\text{C}$ )

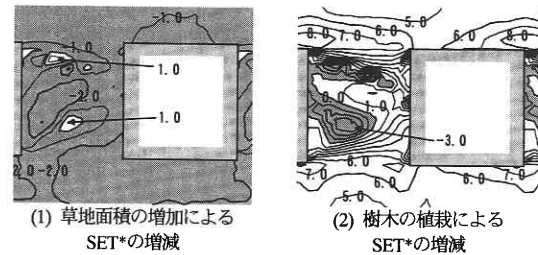


図 12 緑地の規模、種類の変化による SET\* 増減 (高さ 1.5 m, 単位:  $^{\circ}\text{C}$ )  
 ・ 図中の灰色の領域は SET\* が低下し、夏季の温熱環境が改善された領域を示す。

参 考 文 献

- 1) 吉田, 村上, 持田, 大岡, 富永, 生産研究, 第 51 巻第 1 号, 11-16, 1999.1.
- 2) 吉田, 大岡, 村上, 持田, 富永, 生産研究, 第 50 巻第 1 号, 73-77, 1998.1.
- 3) Yamada, T., J. Meteorol. Soc. Japan 60, pp. 439-454, 1982.
- 4) 平岡, 丸山, 中村, 桂, 建築学会計画系論文報告集, 第 406 号, 1-9, 1989.
- 5) Uchijima, Z., Bull. Nat. Inst. Agric. Sci., Vol. A, 243-263.
- 6) 植村, 成田, 村上他, 建築学会大会梗概集 (環境 1), 899-890, 1999.9.
- 7) 吉田, 村上, 大岡他, 建築学会大会梗概集 (環境 1), 937-938, 1998.9.
- 8) 村上, 持田, 金他, 建築学会大会梗概集 (環境 1), 877-880, 1997.9.