

## ＜付録＞資料 1

「夏季晴天時における新国立競技場周辺域の樹冠解像熱環境シミュレーション」について

本分科会では、2014年5月にスポーツ振興センターにより公表された新国立競技場の案には、人工地盤上にほとんど樹木がなく、盛夏に開催されるオリンピックにおいては熱環境上、極めて過酷になると判断し、独立行政法人海洋研究開発機構地球情報基盤センターの協力をえて熱環境の分析を行った。検討を行ったものは、2014年5月の案と人工地盤を見直し森とせせらぎを再生した案であり、地球シミュレーターを用いて比較を行った。

方法は、独立行政法人海洋研究開発機構による都市3次元放射モデルと樹幹解像樹木モデルを実装した大気海洋結合数値モデル MSSG を用いて行い、明治神宮外苑周辺5km四方を対象とする非定常数値シミュレーションを実施し、新国立競技場建設後の熱環境の解析を行った。気象条件には、“典型的なヒートアイランド現象の状況”が見られた2007年8月11日のデータを用いた。この日、日本付近は太平洋高気圧に覆われており、東京では、一日を通して晴天で、最高気温が36.4℃に達した。日射量が最大となる12:00を開始時刻に設定し、30分間のシミュレーションを実施した。その結果、以下の解析結果を得た〔9〕。

・森とせせらぎ再生案では、競技場の周囲の気温が現行案より平均0.5℃、最大2.1℃程度低くなり得ることが明らかになった。

・都市3次元放射モデルにより得られた放射フラックスを用いて算出した競技場の周囲の暑さ指数（WBGT 指数）は、森とせせらぎ再生案では、現行案より平均1.0℃、最大4.6℃程度低くなり得ることが明らかになった。

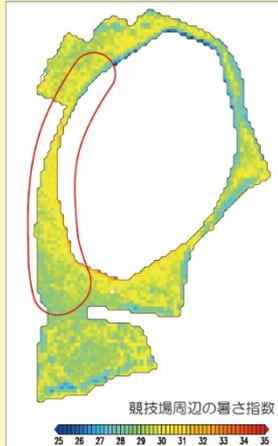
暑さ指数（WBGT 指数、Wet-Bulb Globe Temperature）は、人が感じる暑さは、気温と湿度だけでなく、日射や周囲の高温の地表面や壁面からの赤外放射の強度にも依存する。そこで、人の感じる暑さについて検討するために、暑さ指数（WBGT 指数）が開発され、過酷な熱環境における熱中症リスクを評価するための指標として用いられている。

この解析結果は、森とせせらぎの再生が、熱環境の改善に向けた、一つの可能性を示したものである。本分科会活動の学術的成果として、以下に掲載する。

人工地盤案 (JSC 現行案)

オリンピック開催時は真夏である。新国立競技場の環境 (人工地盤上) は過酷である。

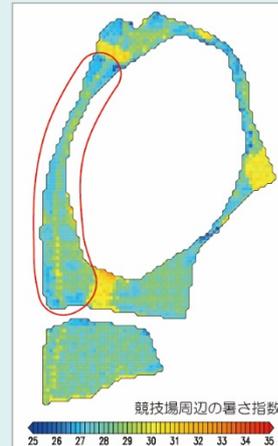
暑さ指数  
(平均値)  
29.6°C



樹林・渋谷川再生案

人工地盤を見直し、清流を復活させ、樹林の中を歩くようにした場合。

暑さ指数  
(平均値)  
28.0°C



暑さ指数 (WBGT 指数) の差 最大 -4.6°C

人工地盤を見直し、樹林と渋谷川を再生させることで、暑さ指数は、平均 1.0°C、最大 4.6°C 程度低くなり得ることが明らかになった。

熱環境シミュレーションに関する出典：松田農吉、大西順、山田悟史、大和広明、石川幹子、高橋桂子 (2014)、夏季晴天時における新国立競技場周辺域の樹冠解像熱環境シミュレーション、第28回数値流体力学シンポジウム

暑さ指数 (Wet-Bulb Globe Temperature, WBGT)

気温だけでなく、湿度や放射熱も考慮した体感温度指標のひとつ。熱中症リスクの評価などに用いられる。



※「環境省熱中症予防情報」(http://www.wbgt.env.go.jp/) に掲載の資料を基に本分科会で加筆を行った。

| 暑さ指数 (WBGT)      | 注意すべき生活活動の目安      | 注意事項  |
|------------------|-------------------|---|
| 危険 (31°C以上)      | すべての生活活動でおこる危険性   | 高齢者においては安静状態でも発生する危険性が大きい。外出はなるべく避け、涼しい室内に移動する。 |
| 厳重警戒 (28 ~ 31°C) | すべての生活活動でおこる危険性   | 外出時は炎天下を避け、室内では温度の上昇に注意する。                      |
| 警戒 (25 ~ 28°C)   | 中等度以上の生活活動でおこる危険性 | 運動や激しい作業をする際は定期的に十分な休息を入れる。                     |
| 注意 (25°C未満)      | 強い生活活動でおこる危険性     | 一般に危険性は少ないが、激しい運動や重労働時には発生する危険性がある。             |

図 19 暑さ指数の相違の検討

# 夏季晴天時における新国立競技場周辺域の樹冠解像熱環境 シミュレーション

Tree-crown-resolving numerical simulations of thermal environment around the New National Stadium Japan under summer-time clear-sky condition

- 松田景吾, (独) 海洋研究開発機構, 横浜市金沢区昭和町 3173-25, E-mail : k.matsuda@jamstec.go.jp
- 大西 領, (独) 海洋研究開発機構, 横浜市金沢区昭和町 3173-25, E-mail : onishi.ryo@jamstec.go.jp
- 山田悟史, 中央大学理工学部, 東京都文京区春日 1-13-27, E-mail : sy.81b@g.chuo-u.ac.jp
- 大和広明, 中央大学理工学部, 東京都文京区春日 1-13-27, E-mail : yamato@tamacc.chuo-u.ac.jp
- 石川幹子, 中央大学理工学部, 東京都文京区春日 1-13-27, E-mail : ishikawa.27w@g.chuo-u.ac.jp
- 高橋桂子, (独) 海洋研究開発機構, 横浜市金沢区昭和町 3173-25, E-mail : takahasi@jamstec.go.jp
- Keigo MATSUDA, JAMSTEC, 3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama
- Ryo ONISHI, JAMSTEC, 3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama
- Satoshi YAMADA, Chuo University, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo
- Hiroaki YAMATO, Chuo University, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo
- Mikiko ISHIKAWA, Chuo University, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo
- Keiko TAKAHASHI, JAMSTEC, 3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama

The Japan Sport Council (JSC) plans to build the New National Stadium Japan (NNSJ) for the 2020 summer Olympics in Tokyo. The numerical simulations of wind and heat transfer around the NNSJ are conducted to compare the heat environments around the NNSJ for the cases of the current JSC plan and the modified plan, in which a lot of trees are placed in the NNSJ premises. The computational domain covers 5km×5km horizontal area, which is discretized by 5m grid mesh interval to resolve the building shapes and the tree crown distribution. The transpiration and the three-dimensional radiation processes are considered. The results show that the air temperature for the modified plan case is about 2.1 °C cooler in maximum than that for the current JSC plan case. The WBGT index decreases about 4.6 °C in maximum for the modified plan case.

## 1. 諸言

2020年の東京オリンピック開催に伴い、国立競技場の建て替え計画が持ち上がっている。日本スポーツ振興センター (Japan Sport Council, JSC) は、ザハ・ハディド氏による設計案に基づいた新国立競技場 (New National Stadium Japan, NNSJ) の設計案<sup>(1)</sup> (以下, JSC 現行案) を提案している。現状の国立競技場は起伏のある地形の上に位置しているが、JSC 現行案では既存の樹木を伐採して人工地盤による平坦な土台を作り、その上に新国立競技場を建設する計画となっている。この人工地盤には芝生で覆われる部分はあるものの、樹木や日陰となる部分が少ない。2020年東京オリンピックの開催期間が夏季 (7月24日~8月9日) であるため、来場者が過酷な熱環境に置かれる可能性がある。過酷な熱環境の緩和策としては、日よけの設置やミスト散布など、様々な手法を用いることができる。しかし、国立競技場の位置する明治神宮外苑が、明治天皇の業績を後世まで残すことを目的に明治神宮内苑とともに建設され、日本で最初に風致地区に指定された大規模緑地であるという歴史的背景を考慮すると、既存の樹木を伐採せず、新規に樹木を追加することが熱環境緩和策の有力な候補である。樹木の気温低減効果については数多くの既往研究があり、都市部の緑地の気温が周囲より数°C低いという観測結果も報告されている<sup>(2, 3, 4, 5)</sup>。最近では、蛭田・石川 (2012)<sup>(6)</sup> が大気汚染常時監視局による東京都内の気温の観測データを用いて行った統計解析により、夏季日中において観測点周辺の樹木量が多いほど有意に気温が低い傾向があることが報告されている。しかし、どの程度の樹木量があればどの程度の気温低減効果が得られるのかについては明らかになっていない。そこで、本研究では、JSC 現行案をベースに樹木の増加を行った修正計画案 (以下, JSC 修正案) を作成し、JSC 現行案と JSC 修正案を対象とし

て、樹木の流体抵抗、蒸散過程および3次元放射過程を考慮した非定常数値シミュレーションを実施することにより、樹木の増加が新国立競技場周辺の風の流れと熱環境に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

## 2. 数値モデル

### 2.1 数値モデルの概要

数値シミュレーションには、独立行政法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC) で開発された大気海洋結合モデル “MultiScale Simulator for the Geoenvironment” (MSSG)<sup>(7, 8, 9, 10)</sup> を用いた。MSSG は全球スケールから都市スケールまでを取り扱うことのできる数値モデルである。特に、都市スケールでは、建物の形状を解像することにより実在街区に対する Large-eddy simulation (LES) として機能する<sup>(10)</sup>。大気力学過程の支配方程式は、大気密度の輸送方程式、圧縮性 Navier-Stokes 方程式 (運動量保存式)、Helmholtz 方程式 (圧力方程式)、および気体の状態方程式である。数値解法には fractional step 法を用い、時間積分には3次精度レンゲ・クッタ法を用いた。水物質については、雲水、雨水および氷粒子の輸送を考慮せず、水蒸気の輸送のみを考慮した。乱流モデルには、サブグリッドスケール (sub-grid scale, SGS) の乱流運動エネルギーの輸送を考慮した1方程式乱流モデル<sup>(11)</sup> を用いた。計算格子には、デカルト座標系に従う等間隔直交格子を用いた。建物については、voxel 表現法により解像した。樹冠についても、葉面積密度  $a$  の空間分布として解像した。建物や樹木が熱環境に及ぼす影響を考慮するために、次節以降に詳述する都市3次元放射モデル、地表面・壁面モデル、および樹冠解像樹木モデルおよびを用いた。

## 2.2 都市 3 次元放射モデル

建物や樹冠の 3 次元形状を考慮して、表面温度や熱フラックスを決定するために、都市 3 次元放射モデルを用いた。都市 3 次元放射モデルでは、建物表面と地表面を大気場の計算格子に沿って分割した面積要素、および樹冠を同様に分割した体積要素で構成される非構造格子を用いる。面積・体積要素間の短波（可視光線）および長波（赤外線）の放射熱フラックスは、以下のラジオシティ方程式により算出される。

$$\begin{aligned} \langle A^{\text{eff}} \rangle_i R_{\lambda,i} &= \langle A^{\text{eff}} \rangle_i \epsilon_{\lambda,i} B(T_{\text{surf},i}) \\ &+ \alpha_{\lambda,i} \left\{ S_{\lambda,i} + \sum_j A_{i \leftarrow j}^{\text{eff}} F_{ij} R_{\lambda,j} \right\} \quad (1) \end{aligned}$$

ここで、 $R_{\lambda,i}$  は波長帯  $\lambda$  における要素  $i$  のラジオシティ [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] であり、要素  $i$  から射出される放射フラックスを表す。 $S_{\lambda,i}$  は天空からの入射フラックス [ $\text{W}$ ] であり、短波では直達日射と散乱日射、長波では大気長波放射が考慮される。 $\epsilon_{\lambda,i}$  および  $\alpha_{\lambda,i}$  は波長帯  $\lambda$  における要素  $i$  のそれぞれ射出率 [-] および反射率 [-] であり、 $\epsilon_{\lambda,i} + \alpha_{\lambda,i} = 1$  を満たす。 $B(T_{\text{surf},i})$  は表面温度  $T_{\text{surf},i}$  での熱放射フラックス [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] である。また、 $F_{ij}$  は要素  $i$  から要素  $j$  を見込む形態係数であり、建物や樹冠の幾何学的配置によって決定される。本研究では、各要素間の形態係数  $F_{ij}$  を光線追跡法により算出した。その際、体積要素である樹冠を半透明の物体と見做し、その透過率  $\text{trans}$  を次式 (Beer-Lambert 則) により与えた<sup>(18)</sup>。

$$\text{trans} = \exp(-k l) \quad (2)$$

ここで、 $k$  は樹冠の消散係数、 $l$  は光線の通過長さである。体積要素では、この透過率を用いて、有効面積  $A^{\text{eff}} [\text{m}^2]$  および有効表面積  $\langle A^{\text{eff}} \rangle [\text{m}^2]$  を与えた。なお、街区スケールでは、要素間の放射の授受における大気の減衰・散乱効果は無視できるほど小さい。天空からの入射フラックスについては、太陽高度を考慮した経験モデル<sup>(12, 13, 14)</sup> を用いて推定した。

## 2.3 地表面・壁面モデル

都市 3 次元放射モデルを用いて計算されたラジオシティを用いて、地表面および壁面における熱収支を面積要素ごとに計算し、表面温度を算出した。地表面・壁面の表面の熱収支は次式により表される。

$$R_{S,\text{net}} + R_{L,\text{net}} - H - LE = G \quad (3)$$

ここで  $R_{S,\text{net}}$  および  $R_{L,\text{net}}$  は地表面・壁面により吸収されるそれぞれ正味の短波および長波放射熱フラックス [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]、 $G$  は地表面・壁面の内部への熱伝導による熱フラックス [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] である。また、 $H$  および  $LE$  はそれぞれ地表面・壁面からの顕熱および潜熱フラックス [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] であり、次式により表される。

$$\begin{aligned} H &= -\alpha_h (T_{\text{air}} - T_{\text{surf}}) \quad (4) \\ LE &= -L\beta\alpha_m (e - e_{\text{surf},\text{sat}}) \quad (5) \end{aligned}$$

ここで、 $\alpha_h$  は対流熱伝達係数 [ $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$ ]、 $\alpha_m$  は対流物質輸送係数 [ $\text{kg}/(\text{s m}^2 \text{Pa})$ ] であり、Jürges の式に従って与えた。 $L$  は蒸発潜熱 [ $\text{J}/\text{kg}$ ]、 $T_{\text{air}}$  は気温 [ $\text{K}$ ]、 $T_{\text{surf}}$  は表面温度 [ $\text{K}$ ]、 $e$  は大気中の水蒸気分圧 [ $\text{Pa}$ ]、 $e_{\text{surf},\text{sat}}$  は表面温度  $T_{\text{surf}}$  における飽和水蒸気分圧 [ $\text{Pa}$ ]、 $\beta$  は蒸発効率 [-] である。熱伝導による熱フラックス  $G$  は地表面や壁面の蓄熱量に依存するため、各面積要素の内部を 7 層に分割し、熱拡散方程式を用いて各層の温度の時間変化を計算した。各層の厚さや熱物性値については、面積要素の配置や属性に応じて与えた。地表面や壁面に働く摩擦抗力については、対数則に基づいて与えた。

## 2.4 樹冠解像樹木モデル

本樹木モデルでは、解像された樹冠の内部を通過する大気の流れも考慮した。その際、樹冠が大気の流れに及ぼす抗力  $F_i$  は次式により与えられる<sup>(15)</sup>。

$$F_i = -C_d \rho a U^2 \frac{u_i}{|U|} \quad (6)$$

ここで、 $C_d$  は抗力係数 [-]、 $a$  は葉面積密度 [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ]、 $U$  は風速 [ $\text{m}/\text{s}$ ]、 $\rho$  は密度 [ $\text{g}/\text{m}^3$ ] である。なお、葉が密に茂っている場合でも空間に占める樹木の枝や葉の体積占有率は数%程度であるため、枝や葉の体積占有率を 0 と仮定した。また、SGS 乱流運動エネルギーの輸送方程式においては、葉による wake production とエネルギー消散の効果を考慮した<sup>(16, 17)</sup>。樹冠の熱収支においては、枝や葉の体積占有率が小さいため、熱容量を無視することができる。したがって、樹冠の葉表面の熱収支計算は次式で表される。

$$R_{pS,\text{net}} + R_{pL,\text{net}} - H_p - LE_p = 0 \quad (7)$$

ここで、 $R_{pS,\text{net}}$  および  $R_{pL,\text{net}}$  はそれぞれ樹冠に吸収される正味の短波および長波放射熱フラックス [ $\text{W}$ ] である。また、 $H_p$  および  $LE_p$  はそれぞれ葉面からの顕熱および潜熱フラックス [ $\text{W}$ ] であり、次式により表される<sup>(18)</sup>。

$$H_p = -V a \alpha_h (T_{\text{air}} - T_{\text{leaf}}) \quad (8)$$

$$LE_p = -V a L \beta_p \alpha_m (e - e_{\text{leaf},\text{sat}}) \quad (9)$$

ここで、 $V$  は計算セル（体積要素）の体積 [ $\text{m}^3$ ]、 $T_{\text{leaf}}$  は葉面温度 [ $\text{K}$ ]、 $e_{\text{leaf},\text{sat}}$  は葉面温度  $T_{\text{leaf}}$  における飽和水蒸気圧 [ $\text{Pa}$ ]、 $\beta_p$  は葉面の蒸発効率 [-] である。なお、式 (7) は計算セル（体積要素）当たりの熱フラックスの収支式であり、式 (7) を満たすように、葉面温度  $T_{\text{leaf}}$  を決定する。

## 3. 計算条件

### 3.1 対象ケース

シミュレーションの対象ケースとしては、現況 (Case1)、JSC 現行案 (Case2)、JSC 修正案 (Case3) の 3 ケースを設定した。本稿では JSC 現行案 (Case2) および JSC 修正案 (Case3) について記述する。シミュレーションの対象領域は、明治神宮外苑付近を中心とする 5km 四方の領域である。水平・鉛直方向の計算格子幅を 5m に設定し、水平方向に 1000 × 1000 点、鉛直方向に 80 点の計算格子を用いた。JSC 現行案 (Case2) では、第 5 回国立競技場将来構想有識者会議の公開資料<sup>(1)</sup> に従って 5m メッシュデータを作成した。なお、安定に計算を実行するために、5m メッシュデータでは新国立競技場側面のピロティや競技場内部の庇などの詳細形状を無視した。JSC 修正案 (Case3) は、既存の樹木を維持し、さらに樹木を追加した新規計画案である。JSC 現行案との主な相違点は、以下の通りである。

- (1) 既存の樹木を維持するために人工地盤を設置せず、現況の地形と土地利用を保持する。
- (2) 競技場敷地内の主要路以外の部分に、樹冠の水平投影面積率が 60%程度となるように樹木を配置する。
- (3) 現在、新宿御苑から競技場の西側にかけての暗渠を流れている渋谷川について、その上に樹冠を配置せず、暗渠を開いて川を再生する。

なお、3 点目は都市デザインの観点から修正案に盛り込まれた。この差異の影響については、ここでは議論しない。また、JSC 修正案 (Case3) での新国立競技場の本体形状については、地形の変更に伴う微修正はあるものの、基本的には JSC 現行案 (Case2) に従った。