

(3) 提言までの経緯

本分科会は、第22期より継続して、神宮内苑・外苑について、その歴史的意義、100年を経過した森の現況について、調査・研究を行ってきた^[3]。明治神宮の森は、市民共有の財産であるという視点から、研究の成果を公表し、多様な意見を活かしていくことを目的とし、平成25年12月12日には、日本学術会議公開シンポジウム「神宮の森・これまでとこれからの100年-鎮座百年記念・第二次明治神宮境内総合調査から-」を、平成27年2月20日には、「神宮の森と東京オリンピック2020を考える」を開催し、いずれも、多くの参加者と共に、活発な議論を行った。

本分科会は、ここまでの検討を踏まえて、明治神宮外苑の一角を占める本地域において歴史的に形成されてきた自然豊かな文化的な佇まいを継承して、将来の世代に引き渡すことが必要という観点とともに、東京オリンピック・パラリンピックの成功を願う観点から以下の提言を行う。その際、人工地盤については、現計画の諸条件を尊重しながら、人工地盤部を縮小して自然な地盤上の植栽を増やすことで、費用削減と持続可能な豊かな緑を確保しようとするものである。また、渋谷川の復元については、同じく現計画の諸条件を尊重しながら、清流復活と相俟って、自然豊かな佇まいの復元を図ろうとするものである。

3 提言の内容

(1) 提言1 人工地盤を見直し、**神宮の森の生態系の特質を踏まえ、大地に根ざした水循環を可能とする「本物の森」を創り出す。**

新国立競技場の建設が行われている神宮外苑は、良好な環境を維持継承するために定められた風致地区であり、大正年間より100年の歳月をかけ守り、育てられてきた。**新国立競技場建設地の既存樹木は、1545本が伐採、219本が移植される予定である。しかしながら、現在、緑化計画に位置が示されている移植樹は、わずかに1本（天然記念物）であり、74本は人工地盤上への移植、144本の移植計画は明示されていない。人工地盤上は、大地との水循環が遮断されており、建築構造物の寿命からみても100年を越えて永続していく森に成長していくことは不可能である。また、人工地盤上の計画された樹種では、木陰がほとんど確保されないことから、オリンピック開催時の盛夏における熱環境は、極めて過酷なものになると推定される。**

したがって、神宮外苑の基本的理念である「良好な環境形成」を揺ぎない原則として次世代へと手渡す観点から、スポーツ振興センターは、主として地下施設のない人工地盤の広場を見直し、神宮の森の生態系の特質を踏まえた検討を行い、水循環を回復させ、歴史と環境を尊重する東京の姿勢を世界に示すべきである。国と東京都は、この施策の実現に向けて、全面的支援を行うべきである。

具体的な人工地盤の見直しについての提言は、新国立競技場の施設計画に準拠し、地下施設及び動線計画を踏まえて行うものとする。図16は、新国立競技場の周辺環境を、上記

の視点から分類したものである。全部で7つのタイプに分けられる。

以下、この7つのタイプごとに、人工地盤の下の地下施設及び動線について検討し、森とせせらぎの再生方針について述べる。

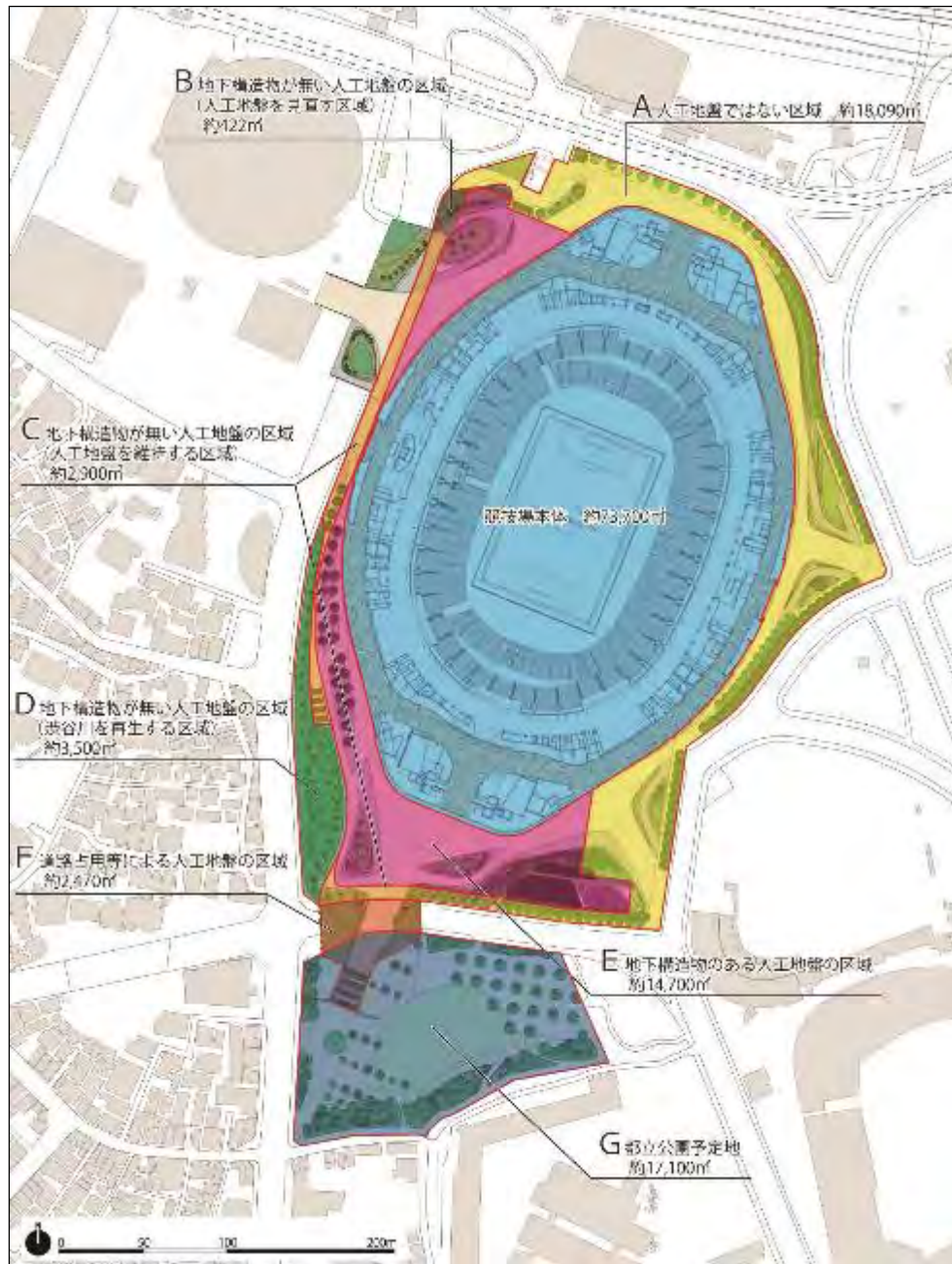


図 16 新国立競技場および周辺地域の地盤区分図

(面積はスポーツ振興センター公表資料を踏まえて、本分科会で計測した概数である。)

A：人工地盤ではない区域 (約18,090㎡)

新国立競技場建設予定地は、東側が台地であり西側が谷地となっている。比高差は、約7～8mであり、東側は台地に連続しているため人工地盤ではなく、また地下施設も計画されていない。したがって、この区域では、現在の植栽計画の問題と解決策の提案を行う。

- ① 絵画館の背後の景観的に重要な区域について、神宮の森の生態系の特質を踏まえ再考すべきある。
- ② 天然記念物のスダジイの移植地を再考する。

このスダジイは、幹周り 3.6 m、樹齢 350 年に及ぶ老木である。中心部はすでに洞（うろ）になっており慎重に養生する必要がある。照り返しの強いゲート広場は不適切であり、新設される明治公園の樹林帯の林縁の緑地に植栽すべきと考える。



写真 2 天然記念物に指定されている樹齢 350 年のスダジイ（2014 年 6 月撮影）

B：地下構造物が無い人工地盤の区域（約 4 2 2 m²）

千駄ヶ谷駅方面からみて、景観上、重要な台地と谷の境界となる斜面林のエリアである。斜面林は武蔵野の景観を構成する重要な要素であり、斜面林の再生を行うため、人工地盤を見直す必要があると判断する。武蔵野の斜面林に典型的に出現するイヌシデ・コナラ・イロハモミジ群落が適切である。動線計画上の問題は生じない。

C：地下構造物が無い人工地盤の区域（約 2, 9 0 0 m²）

この区域は東京都体育館方面から、新国立競技場へアクセスする際の主要動線に連続する区域である。外苑西通り上に建設されるペDESTリアン・デッキと連続させる必要があり、スポーツ振興センターの原案通りとする。

しかしながら、基本的問題として、この区域の人工地盤上の通路は幅員が 6 m しかない狭窄した区域があり、内部コンコースの幅員 6 m を加算しても 12 m しかない。多くの人が集まる都市公園や広場の設計における園路幅員の技術基準は 15 m 以上となっており^[12]、非常時の避難等において、問題を有している区域となっていることは、ここで指摘しておく。

D：地下構造物が無い人工地盤の区域（約 3, 5 0 0 m²、渋谷川を再生する区域）

この区域は地下構造物がないが、立体公園に緑がないため、緑地帯を設けるために人工地盤が計画されている。この結果、人工地盤の下となる外苑西通り沿いのエリアが、太陽の差し込むことのない暗い空間となっている。

この問題を解決するためにスポーツ振興センターでは、人工地盤の下の壁面に緑化をす

る提案を行っている。光と水のない空間に豊かな緑を実現するためには、「最先端の緑化技術」を導入し、多額の整備費をかけ、その後の継続的管理費が必要となる。

本分科会は、最先端の緑化技術とは、「過酷な都市環境の中でも、持続可能な緑化であり、しかも過度の整備費用や管理費を要さないもの」と考えている。多額の管理費を充当しなければならない緑化は、たとえ最先端であったとしても「持続性」という規範に照らし、公共的空間への導入は、慎重に検討されるべきと考える。

この問題を解決する最良の案は、人工地盤を見直し、大地に樹木を直接植栽し、「本物の森」をつくりだすことにある。現在計画されている地表部へ下りる階段をそのまま継承すれば、動線計画に支障をきたすことなく、この問題を解決することができる。

当該区域には、暗渠となった渋谷川が、今でも下水道千駄ヶ谷幹線として流れている。下水道については、現在、移設工事が行われているため、上部にせせらぎを再生することを提案する。

E：地下構造物のある人工地盤の区域（約14,700㎡）

地下構造物計画を尊重し、原則としてスポーツ振興センターの案とするが、人工地盤上の植栽計画については見直しが必要である。現行の計画は、並木及びポケットパークとなっているが、樹種の選定、移植樹の導入は持続性のある緑地の形成の観点から適切とはいえない。第二次明治神宮境内総合調査などを踏まえ、学術的成果に準拠し、緑化計画を再検討すべきである。

F：道路占用等による人工地盤の区域（約2,470㎡）

新国立競技場と新設される明治公園を結ぶために巨大なペDESTリアン・デッキが計画されている。写真3、4に見られるように、周辺の景観に大きな影響を与えることになる。また、非常時における避難者の集中も課題である。当該区域は、緩やかな坂道であり、台地の上部には日本青年館などもあり、2つの区域のアクセスは、必ずしも巨大なデッキに依存しなければならない必然性は低い。一方、このデッキが改善されれば、地下に計画されている秩父宮記念スポーツ博物館・図書館は、外苑西通りに沿った明るい視認性の高い魅力的な施設となり、集客性も格段に向上する。以上の理由から、当該エリアにおけるペDESTリアン・デッキは、様ざまの観点を踏まえて、見直すことを提言する。



写真3 明治公園（2014年）



写真4 明治公園（計画案）

（出典）参考文献 [8]

G：都立公園予定地（約17, 100㎡）

新たに整備される都立明治公園予定地である。現時点で計画案は、スポーツ振興センターが作成しているが、神宮の森の生態的特質を全く反映していないこと、渋谷川の再生が盛り込まれていないこと、移植樹木の計画がないこと等の問題がある。公園計画は、地域住民、NPOなど広範な人々が話し合いをしながら合意形成を行い、作成していくことが重要であり、当該地域においても早急に話し合いの場と委員会をつくり、公園の具体的計画に着手することを提案する。

(2) 提言2 渋谷川の清流を復活させ、熱環境・景観の改善をはかり、健全な水循環を回復し、生態系の回廊を形成していく。

新国立競技場の建設予定地である都立明治公園内には、渋谷川が、暗渠となって流れている。新競技場の整備にあたっては、水循環基本法の理念に従い、健全な水循環の回復と、憩いの場としての水環境の再生、熱環境の改善（資料1）、生物多様性に貢献する生態系の回廊（エコロジカル・コリダー）の形成に資するよう、現在、下水道千駄ヶ谷幹線となっている渋谷川の上部に清流を復活させるべきである（図16、17、18）。東京都及びスポーツ振興センターは、その実現に向けて一致、協力を行い、国はこれを全面的に支援すべきである。



図17 渋谷川再生案

東京において下水道の整備が行き渡っていなかった昭和 30 年代は、家庭や工場から流れる排水により河川の汚濁が深刻であった。このため、昭和 36 年 10 月、東京都市計画下水道調査特別委員会は、河川と下水道のあり方について答申を行い、「源頭水源を有しない 14 河川の一部または、全部を暗渠化し下水道幹線として利用する」ものとした。これに伴い、当該地区を流れる渋谷川も、昭和 39 年のオリンピック開催にあわせて暗渠化され、下水道千駄ヶ谷幹線となり、今日に至っている。

その後、東京における下水道整備は、鋭意、実現に移され、清流が復活してきたことは特筆すべき社会資本整備の成果であった。あわせて、地域住民から、身近な水環境の再生を求める動きが草の根のように広がり、各地で清流の復活が実現している。当該地域でも、新宿御苑地区では、平成 23 年に国、新宿区、大学、地域住民の協働によるせせらぎの再生が実現しており、現在、進められている渋谷駅周辺の再開発事業においても、水辺の再生が重要な施策となっている（図 7）。新国立競技場建設予定地は、この中間に位置し、オリンピック・パラリンピックの開催という重大な局面にあつて、かつて地表から姿を消したせせらぎを再生させることは、今後の東京のまちづくりの方向性を指し示す象徴的プロジェクトになると考える。

水源は、水循環基本法の理念に従い、地域の実情に合わせた循環型の水利用のモデルとすべきであり、東京都の定める「水の有効利用促進要綱」にしたがい、巨大な競技場の雨水の利活用によりまかなうこと等を検討すべきである。

(3) 提言 3 水と緑の神宮外苑再生と将来ヴィジョン策定委員会を立ち上げる。

神宮外苑の環境と新国立競技場の調和の検討にあたっては、一過性のオリンピックへの対応に留まらず、将来世代に何を手渡すかのヴィジョンの策定が必要である。国、東京都、スポーツ振興センター、新宿区、渋谷区、**港区**等は、関係する多様な団体、市民、**学識経験者**などの意見を聞き、将来ヴィジョン策定委員会を立ち上げ検討を開始すべきである。

東京における緑地は、先人たちの刻苦奮闘の中で、からくも生み出されてきた。明治政府は、1873 年（明治 6 年）1 月 15 日に太政官布達を発し、古くからの名所旧跡を「公園」として保存、継承していくものとした。東京における上野、芝、深川、浅草、飛鳥山等の公園は、この布達により江戸より継承された。

1932 年（昭和 7 年）には、東京市が周辺 82 町村を合併し、面積が旧市の約 6 倍半の 550 平方キロメートル、人口が 497 万人となったことを受け、東京緑地計画協議会が発足した。この協議会のメンバーは、内務省、東京府、東京市、神奈川県、埼玉県、千葉県、都市計画、造園、建築、土木、交通、社寺、教育、保健の関係者、及び学識経験者より構成されており、大東京のヴィジョンである「東京緑地計画」を、緻密な調査により作りだした。現在、東京にある水元、篠崎、石神井、砧、神代、石神井、小金井、善福寺等の主要な公園は、この計画が基礎となり創り出された^[11]。

オリンピック・パラリンピックの開催は、巨大な整備費を伴う公共事業である。このため、将来世代に何を残しうるのかについての将来ヴィジョンが必要である。1964 年（昭和 39 年）に開催されたオリンピックでは、1946 年（昭和 21 年）に建設されたワシントンハイツが選手村として整備されることとなり、日本政府は、1961 年（昭和 36 年）10 月 24 日、ワシントンハイツの代替施設を調布飛行場隣の関東村に移転するとともに、オリンピック終了後、ワシントンハイツ跡地を森林公園とすることを決定した。森林公園という名称は当時としては、きわめて斬新な発想であった。こうして、神宮の内苑に隣接する地が代々木森林公園となり、都心の緑地のインフラの形成に大きな貢献をすることとなった。代々木森林公園には、日本で初めてのバードサンクチュアリー（野鳥保護区）が設けられ、今日に連なる生態系の再生や自然保護のさきがけとなった。

地球温暖化、エネルギーの問題、首都直下型地震等のリスクの増大、人びとの心の問題等、私たちの時代の直面する問題は国境を越えて、人類すべての問題であるともいえる。東京がどのような未来をめざすのか、その心臓部となる新国立競技場を取り囲む地域は、試金石としての役割が課せられているといえる。

以上の提言をまとめたものが、図 18 に示すイメージ図である。



図18 神宮外苑の環境と調和した新国立競技場改善案のイメージ図
(地下構造物の無い人工地盤の見直しによる渋谷川と樹林の再生案)

＜参考文献＞

- [1] 内務省神社局(1930)『明治神宮造営誌』
- [2] 明治神宮奉賛会(1937)『明治神宮外苑志』
- [3] 鎮座百年記念第二次明治神宮境内総合調査委員会(2013)『鎮座百年記念第二次明治神宮境内総合調査報告書』、明治神宮社務所
- [4] 独立行政法人日本スポーツ振興センター(2014)『新国立競技場基本設計（案）説明書（概要版）』
- [5] 独立行政法人日本スポーツ振興センター(2014)『新国立競技場基本設計図（案）』
- [6] 独立行政法人日本スポーツ振興センター(2014)『新国立競技場完成予想図（案）』
- [7] 東京都(2014)『2020年東京オリンピック・パラリンピック競技大会 実施段階環境影響評価調査計画書の概要』
- [8] 新宿区(2014)『第55回新宿区景観まちづくり審議会 報告2資料「新国立競技場（仮称）整備計画について」』
- [9] 松田景吾・大西領・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
- [10] 進士五十八(2014)「明治神宮の杜は人のつくった森—社叢造園学の誕生と精華—」『GREEN AGE』（特集 明治神宮の森の現在と未来7月号）
- [11] 今泉宜子(2013)『明治神宮——伝統を創った大プロジェクト』、新潮社
- [12] 石川幹子(2001)『都市と緑地』、岩波書店
- [13] 社団法人 日本公園緑地協会(2010)「都市公園技術標準解説書（平成22年度版）」

＜参考資料 1＞環境学委員会都市と自然と環境分科会審議経過

第 22 期

平成 23 年

11 月 16 日 日本学術会議幹事会（第 140 回）

分科会設置、委員決定

12 月 8 日 都市と自然と環境分科会（第 22 期第 1 回）

分科会が今期取り上げる主要課題に関する審議

都市の森として重要な神宮の森について重点的に取り組むことを決定

平成 24 年

8 月 8 日 都市と自然と環境分科会（第 22 期第 2 回）

明治神宮内苑の生態系調査に関する基本的事項の審議

10 月 17 日 都市と自然と環境分科会（第 22 期第 3 回）

明治神宮内苑の生態系調査に関する調査内容の審議

平成 25 年

12 月 12 日 都市と自然と環境分科会（第 22 期第 4 回）

明治神宮内苑総合調査の報告と検討

平成 26 年

1 月 21 日 都市と自然と環境分科会（第 22 期第 5 回）

今後の活動方針についての審議

第 23 期

平成 26 年

11 月 21 日 日本学術会議幹事会（第 205 回）

分科会委員決定

12 月 1 日 都市と自然と環境分科会（第 23 期第 1 回）

分科会が今期取り上げる主要課題に関する審議

第 22 期から検討を継続してきた神宮の森について集中審議

新国立競技場の建設と神宮外苑の環境の調和について提言及びシンポ

ジウムを開催することを決定

平成 27 年

2 月 20 日 都市と自然と環境分科会（第 23 期第 2 回）

分科会の活動方針に関する審議

提言に関する内容の審議と決定

○月○日 日本学術会議幹事会（第 回）

環境学委員会都市と自然と環境分科会提言「神宮外苑の環境と新国立
競技場の調和と向上に関する提言」の承認

＜参考資料２＞日本学術会議公開シンポジウムの開催

１．日本学術会議公開シンポジウム

「神宮の森・これまでとこれからの 100 年-鎮座百年記念・第二次明治神宮境内総合調査から-」

場所 日本学術会議講堂

日時 平成 25 年 12 月 12 日 13:00～17:00

主催 日本学術会議 環境学委員会 都市と自然と環境分科会

２．日本学術会議公開シンポジウム

「神宮の森と東京オリンピック 2020 を考える」

場所 日本学術会議講堂

日時 平成 27 年 2 月 20 日（金）13:30～17:00

主催 日本学術会議 環境学委員会 都市と自然と環境分科会

後援 （公社）日本造園学会、（一社）水文・水資源学会、（公社）日本都市計画学会、
（公社）土木学会、（一社）日本建築学会、（一社）環境情報科学センター、
（NPO）日本都市計画家協会

＜付録＞資料 1

「夏季晴天時における新国立競技場周辺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 5 km 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、参考資料として掲載する。

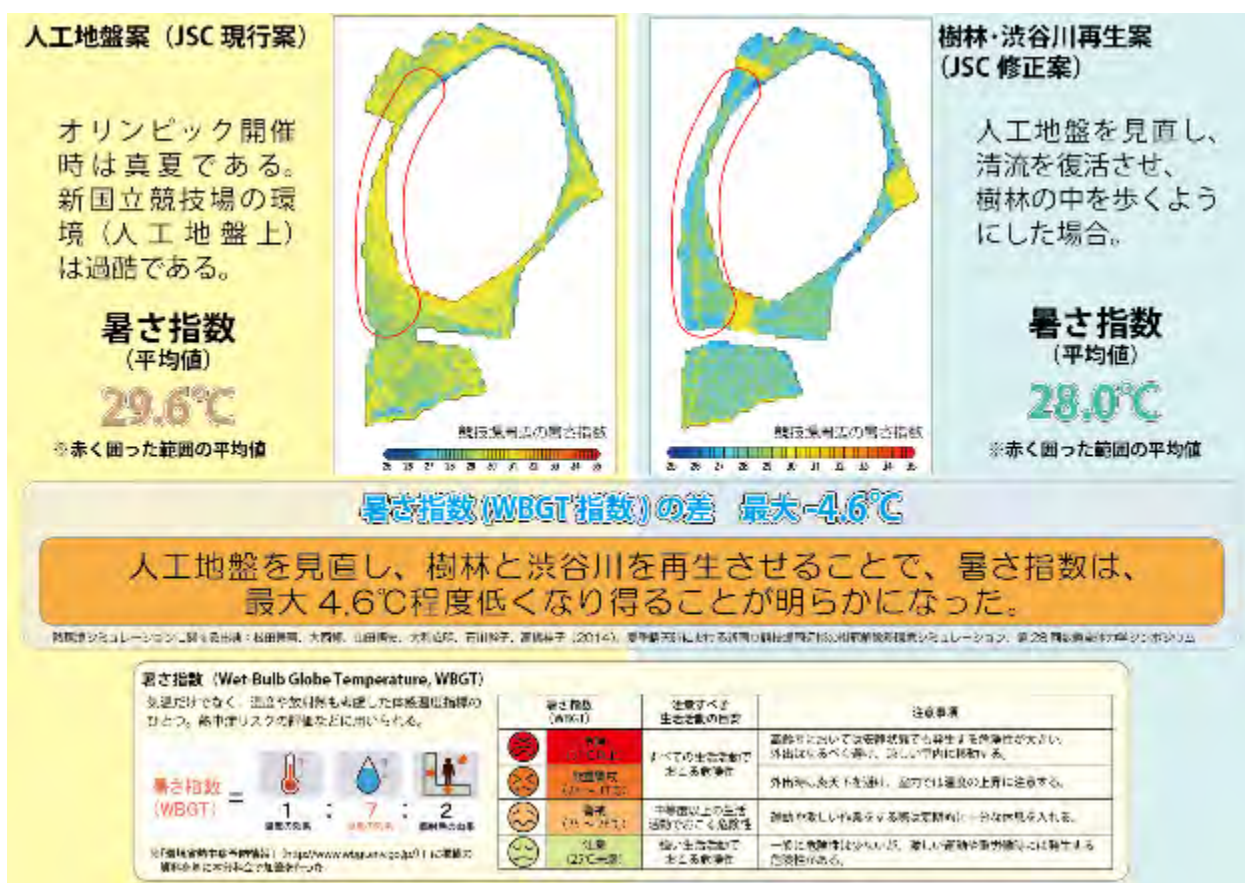


図 暑さ指数の相違の検討

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@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@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⁽¹⁾ (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。この人工地盤上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^(2, 3, 4, 5)。最近では、荏田・石川⁽²⁰¹²⁾⁽⁶⁾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)^(7, 8, 9, 10)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⁽¹⁰⁾。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 Runge-Kutta 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⁽¹¹⁾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。

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

ここで、 $R_{\lambda,i}$ は波長帯 λ における要素 i のラジオシティ [W/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 [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 λ 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 [W/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 trans. を次式 (Beer-Lambert 則) により与えた⁽¹⁸⁾。

$$\text{trans.} = \exp(-kal) \quad (2)$$

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大減衰・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^(12, 13, 14)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 [W/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 [W/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 [W/m^2] であり、次式により表される。

$$H = -\alpha_h (T_{\text{air}} - T_{\text{surf}}) \quad (4)$$

$$LE = -L\beta\alpha_m (e - e_{\text{surf},\text{sat}}) \quad (5)$$

ここで、 α_h は対流熱伝達係数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$]、 α_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 [J/kg]、 T_{air} は気温 [K]、 T_{surf} は表面温度 [K]、 e は大気中の水蒸気分圧 [Pa]、 $e_{\text{surf},\text{sat}}$ は表面温度 T_{surf} における飽和水蒸気分圧 [Pa]、 β 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⁽¹⁵⁾。

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

ここで、 C_d は抗力係数 [-]、 α は葉面積密度 [m^2/m^3]、 U は風速 [m/s]、 ρ は密度 [g/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検討した^(16, 17)。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 [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 [W] であり、次式により表される⁽¹⁸⁾。

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

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

ここで、 V は計算セル（体積要素）の体積 [m^3]、 T_{leaf} は葉面温度 [K]、 $e_{\text{leaf},\text{sat}}$ は葉面温度 T_{leaf} における飽和水蒸気分圧 [Pa]、 β_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_{leaf} を決定する。

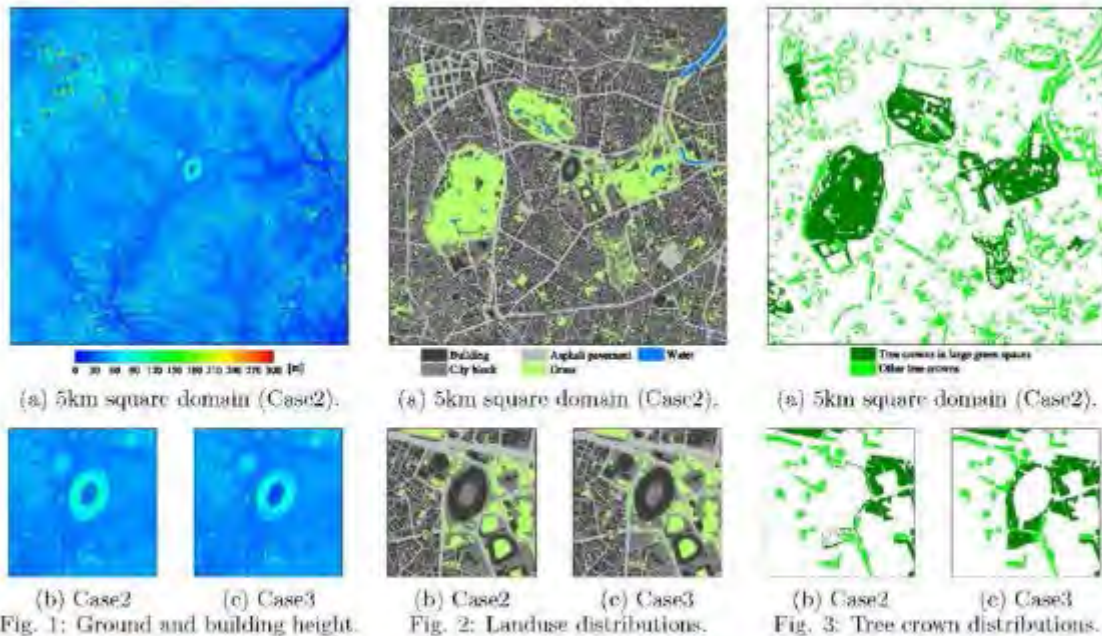
3. 計算条件

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⁽¹⁾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。



新国立競技場敷地外の建物高さおよび土地利用データについては、足永・健屋 (2010)⁽¹⁹⁾の方法に従って 2005 年時点の 5m メッシュデータを整備した。図 1 および図 2 にそれぞれ計算領域内の地形・建物高さおよび土地利用属性の分布を示す。競技場敷地の周囲の樹木分布については、現況の樹木分布データを使用した。図 3 に計算領域内の樹冠の分布を示す。なお、樹高については十分なデータが揃っていないため、樹木を大規模緑地の樹木とそれ以外の樹木に大別し、葉面積密度を設定した。具体的には、大規模緑地の樹木では、樹高を 15m、樹冠底面高さを 5m とし、葉面積密度を $0.57\text{m}^2/\text{m}^2$ (葉面積指数: 5.7) に設定した^(4, 5)。一方、それ以外の樹木では、樹高を 10m、樹冠底面高さを 5m とし、葉面積密度を $1.0\text{m}^2/\text{m}^2$ に設定した。また、人工排熱として個々の建物の空調排熱、地域冷暖房施設排熱、および自動車排熱を考慮し、顕熱および潜熱を入力した。ただし、新国立競技場に導入予定の地域冷暖房システムについては詳細が明らかになっていないため、その排熱はないものとした。

3.2 気象条件

気象条件には、“典型的なヒートアイランド現象の状況”⁽²⁰⁾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。初期値および境界値には気象庁のメソ数値予報モデル (MSM) 再解析データを用いた。流入風の風向は東北東であり、風速は地上 10m の高さで 2m/s 程度である。

4. 結果および考察

4.1 広域の気温分布

図 4 に、Case2 の地上 2.5m における気温の 12:20 から 12:30 までの 10 分間の時間平均値の分布を示す。なお、5km 四方の計算領域全体を図示した。図より、明治神宮内苑・外苑や新宿御苑、赤坂御用地などの大規模な緑地において気温が低い傾向があることがわかる。一方、建物の密集した地域において気温が高い傾向がある。また、図は示していないが、相対湿度についても、大規模緑地で高く、建物の密集地域で低い傾向があり、地表面付近の気温と湿度の水平分布が緑地の分布と対応することが確認された。なお、神田ら (1997)⁽⁵⁾が 1995 年 8 月 10 日

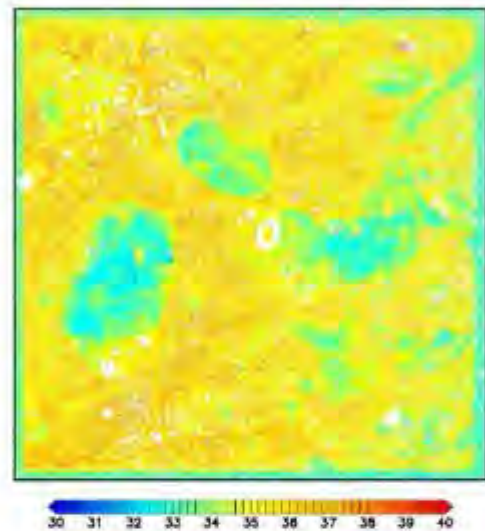


Fig. 4: Horizontal distribution of air temperature (°C) at 2.5m height averaged during 12:20-12:30 (Case2).

(最高気温 35.2℃) に明治神宮内苑で行った観測では、明治神宮内苑の中心部の気温が神宮内苑の周囲に比べておよそ 4℃低い傾向が確認されている。図 4 では、明治神宮内苑の中心部の気温が周囲より 3~4℃程度低い。この気温差は、神田らの観測結果と整合している。

図 5 に Case2 の 12:30 における温位の等値面の 3 次元可視化図を示す。建物形状 (灰色) と樹木 (緑色) の分布を可視化し、305.9K、307.5K、および 309.0K の温位の等値面を、それぞれ水色、黄および赤で表示した。図の右側から比較的気温の低い空気が流入し、風下へ流れるに当たって都市による加熱を受けている様子が確認できる。赤坂御用地や新宿御苑、明治神宮内苑などの大規模緑地には比較的冷たい空気塊があり、都市による加熱の影響が小さい。また、新国立競技場には、赤坂御用

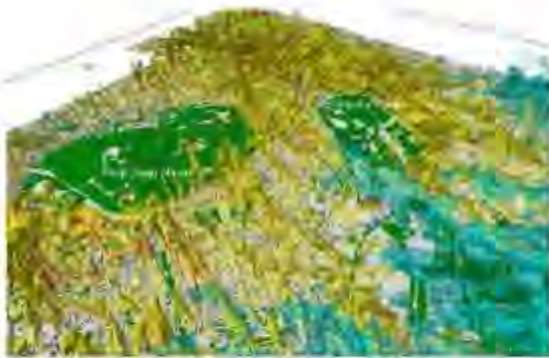


Fig. 5: Isosurface of potential temperature at 12:30 for Case2; red, 309.0K; yellow, 307.5K; cyan, 305.9K.

地を通過した風が流入している。同様の傾向はCase3の風位の等値面においても確認された。

4.2 新国立競技場周辺の風の流れ、気温および湿度

図6に、新国立競技場敷地内において12:20から12:30までの10分間の時間平均の風の流れを示す。なお、新国立競技場の周囲の敷地内のみを明示しており、内部の白抜き部分は競技場建物の本体の位置である。なお、Case2では人工地盤を建設するため敷地範囲がCase3よりも広がっている。計算領域への流入風の風向きが東北東であるため、新国立競技場には東から風が吹き付け、競技場の周囲を回り込むように流れている。また、Case3ではCase2に比べて風が弱まっている。これは、Case2では新国立競技場の周囲が開けているが、Case3では抵抗となる樹木が一面に横わっていることに起因する。

図7および8に、それぞれ新国立競技場敷地内の気温 T_{air} および相対湿度 R_h の分布を示す。図6と同様に、値は12:20から12:30までの10分間の時間平均値である。また、表1に気温、湿度およびその他の気象指標の敷地内平均値、最大値および最小値を示す。図7の気温 T_{air} の分布では、Case2において競技場の南西方向に高温の箇所が見られる。これは、地表面のアスファルトだけでなく、競技場側面が日射によって高温になることに起因する。一方、Case3では、樹木の蒸散効果や日陰効果により、Case2に比べて0.5℃以上低温の領域が広がっている。敷地内平均値ではCase3の方が約0.5℃、局所的には最大で約2.1℃低い。図8の相対湿度 R_h の分布では、気温の高い場所ほど相対湿度が低い傾向が見られる。これは、飽和水蒸気量の温度依存性に起因している。そのため、Case3の比較的気温が低い場所では、Case2に比べて相対湿度が高い。ただし、Case3では、Case2に比べて樹木が多いため、蒸散効果によって水蒸気の絶対量も増加している。図には示していないが、Case3の競技場の南西方向の相対湿度が比較的高い場所では、水蒸気の絶対量がCase2よりも多くなっていることを確認している。しかし、Case3とCase2の相対湿度の差は、最大でも7%程度である。

4.3 暑さ指数 (WBGT 指数)

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 (Wet-Bulb Globe Temperature index, WBGT index) を算出した。暑さ指数は、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おり、気温 (乾球温度) T_{air} 、湿球温度 T_{wb} 、および黒球温度 T_{globe} を用いて算出される。黒球温度 T_{globe} は、グローブ球 (黒球) を用いて測定される温度指標であり、周囲から受ける放射熱フラックスとグローブ球周りの対流熱伝達 (放熱) のバランスによって決まる。本研究では、3次元放射モデルにより得られた各地表面や壁面からの

放射熱フラックスと、気温および風速のデータを用いて、黒球の熱収支式を解くことにより地上高さ1.1mでの黒球温度を算出した。暑さ指数の計算式は、日射の当たる場所と当たらない場所で異なる。“屋内または屋外の日射の当たらない場所”および“屋外の日射の当たる場所”の暑さ指数をそれぞれ $WBGT_{shaded}$ および $WBGT_{sun}$ とすると、これらは以下の式によって算出される。

$$WBGT_{shaded} = 0.7T_{wb} + 0.3T_{globe} \quad (10)$$

$$WBGT_{sun} = 0.7T_{wb} + 0.2T_{globe} + 0.1T_{air} \quad (11)$$

本研究では、日陰率 σ を用いて次式によりWBGTを定義した。

$$WBGT = \sigma WBGT_{shaded} + (1 - \sigma) WBGT_{sun} \quad (12)$$

図9に暑さ指数の分布を示す。Case3では、Case2に比べて暑さ指数が1℃以上低い領域が敷地内の大部分を占めており、暑熱環境が改善されていることがわかる。敷地内平均値でもCase3の方が約1.0℃低く、局所的には最大で約4.6℃の低下が見られる。なお、局所的には暑さ指数が上昇した場所もあり、最大で3.3℃に達している。これはCase2に比べて風速が低下したこと、治道から気温の高い風が流入したこと、地表面の芝生がなくなったこと、および樹木が移動したことによるものである。表1に示した湿球温度 T_{wb} と黒球温度 T_{globe} の差より、この2ケースの場合には黒球温度 T_{globe} が暑さ指数に大きな影響を及ぼしていることがわかる。したがって、樹木による日射の遮蔽、その日陰による地表面および壁面温度の上昇の抑制、および蒸散効果による樹冠下部の葉面温度の上昇の抑制が、Case3における暑さ指数改善の主要因であると考えられる。

5. 結論

3次元放射モデルおよび樹冠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、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。新国立競技場の周囲についてはJSC (日本スポーツ振興センター) 現行案と、敷地内の樹冠の水平投影面積率が60%程度となるように樹木を植えたJSC修正案を設定し、比較を行った。その結果、JSC修正案では、競技場の周囲の気温がJSC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。また、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暑さ指数 (WBGT 指数) の評価を行った。その結果、JSC修正案では、競技場の周囲の暑さ指数がJSC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。

謝辞

本研究の数値シミュレーションは、(株) 海洋研究開発機構の地球シミュレータ2、SCI ICE-XシステムおよびSCI UVシステムを用いて行われた。また、本研究を行うにあたり、気候変動適応研究推進プログラム (RECCA) の支援を受けた。

参考文献

- (1) 独立行政法人 日本スポーツ振興センター, “資料2 新国立競技場基本設計図 (案),” 第5回国立競技場将来構想有識者会議 (2014).
- (2) Saito, I. et al., “Study of the Effect of Green Areas on the Thermal Environment in an Urban area,” *Energy Build.*, 15-16 (1990/91), pp. 493-498.
- (3) Vu, T. C. et al., “Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park,” *Energy Build.*, 29 (1998), pp. 83-92.

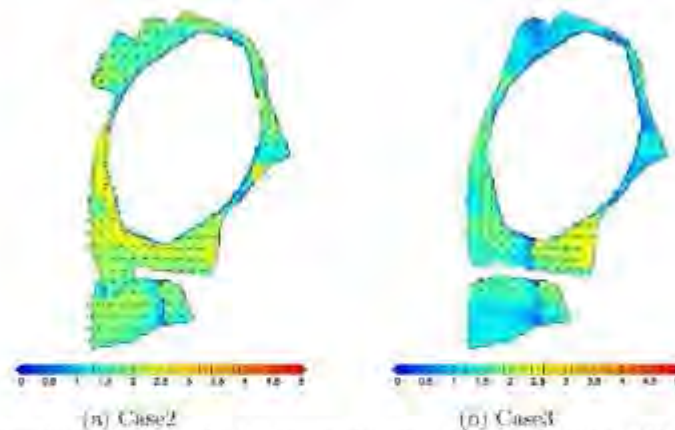


Fig. 6: Wind speed (m/s) at 2.5m height averaged during 12:20-12:30 at the NNSJ premises.

Tab. 1: Temporal and spatial average thermal conditions in the NNSJ premises during 12:20-12:30.

	Case2	Case3	Case3 - Case2
	Ave. (Max./Min.)	Ave. (Max./Min.)	Ave. (Max./Min.)
T_{air} ($^{\circ}\text{C}$)	34.81 (36.62/33.85)	34.35 (35.74/33.85)	-0.46 (-1.00/-2.10)
Rh (%)	40.15 (42.49/35.79)	41.53 (44.49/38.56)	+1.38 (+7.30/-2.48)
T_{wb} ($^{\circ}\text{C}$)	24.05 (24.58/23.65)	24.00 (24.51/23.62)	-0.05 (+0.56/-0.56)
T_{globe} ($^{\circ}\text{C}$)	44.62 (63.28/28.16)	38.99 (60.11/28.17)	-5.63 (-15.03/-22.22)
WBGT ($^{\circ}\text{C}$)	29.31 (33.50/25.31)	28.25 (32.74/25.33)	-1.06 (+3.27/-4.59)

- (4) 森脇, 神田, 横山, 高柳, 浜田, “「神宮の森」の蒸散活動と熱収支 1996 年夏期集中観測,” 水工学論文集, 41 (1997), pp. 43-48.
- (5) 神田, 森脇, 高柳, 横山, 浜田, “明治神宮の森の気候緩和機能・大気浄化機能の評価 (I) 1996 年夏期集中観測,” 天気, 44 (1997), pp. 723-731.
- (6) 嵯田, 石川, “緑地が与える気温低減効果の評価に向けた緑地指標に関する研究,” 都市計画論文集, 47 (2012), pp. 259-264.
- (7) Takahashi, K. et al., “Nonhydrostatic atmospheric GCM development and its computational performance,” In Proc. of 11th Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology (2005), pp. 50-62.
- (8) Baba, Y. et al., “Dynamical Core of an Atmospheric General Circulation Model on a Yin-Yang Grid,” Mon. Wea. Rev., 138 (2010), pp. 3988-4005.
- (9) Onishi, R. and Takahashi, K., “A Warm-Bin - Cold-Bulk Hybrid Cloud Microphysical Model,” J. Atmos. Sci., 69 (2012), pp. 1474-1497.
- (10) Takahashi, K. et al., “Challenge toward the prediction of typhoon behavior and down pour,” J. Physics, 454 (2013), 012072.
- (11) Deardorff, J. W., “Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model,” Boundary-Layer Meteor., 18 (1980), pp. 495-527.
- (12) Kondo, J., “Analysis of Solar Radiation and Downward Long-wave Radiation Data in Japan,” Sci. Reports Tohoku Univ. (Ser. 5, Geophysics), 18 (1967), pp. 91-124.
- (13) 近藤・三浦, “地表面日射量の実験式と日射計をチェックする簡便な方法,” 天気, 30 (1983), pp. 45-51.
- (14) 近藤ら, “日射量および下向き大気放射量の推定,” 天気, 38 (1991), pp. 41-48.
- (15) Shaw, R. H. and Schumann, U., “Large-eddy simulation of turbulent flow above and within a forest,” Boundary-Layer Meteor., 61 (1992), pp. 47-64.
- (16) 神田, 嵯田, 日野, “植生・大気境界面における大規模渦構造と運動量交換に関する LES モデルによる検討,” 土木学会論文集, 461 (1993), pp. 39-48.
- (17) Kanda, M. and Hino, M., “Organized structures in developing turbulent flow within and above a plant canopy, using a large eddy simulation,” Boundary-Layer Meteor., 68 (1994), pp. 237-257.
- (18) 吉田, 大岡, 持田, 富永, 村上, “樹木モデルを組み込んだ対流放射伝熱気輸送連成解析による樹木の屋外環境緩和効果の検討,” 日本建築学会計画系論文集, 536 (2000), pp. 87-94.
- (19) 足永, 健児, “地球シミュレータを用いた東京 23 区全域における高解像度のヒートアイランド数値解析,” 国研研資料, 583 (2010).
- (20) 気象庁, ヒートアイランド監視報告 (平成 19 年冬・夏・関東・近畿地方) (2008).

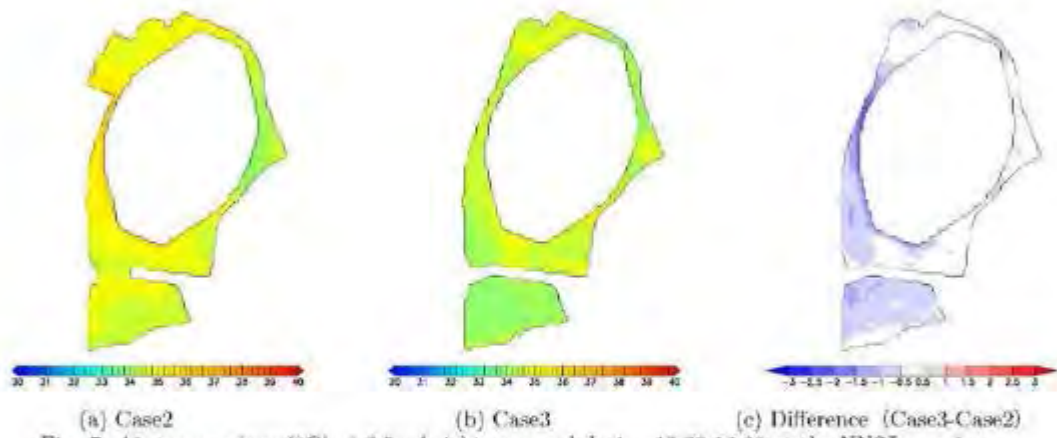


Fig. 7: Air temperature ($^{\circ}\text{C}$) at 2.5m height averaged during 12:20-12:30 at the NNSJ premises.

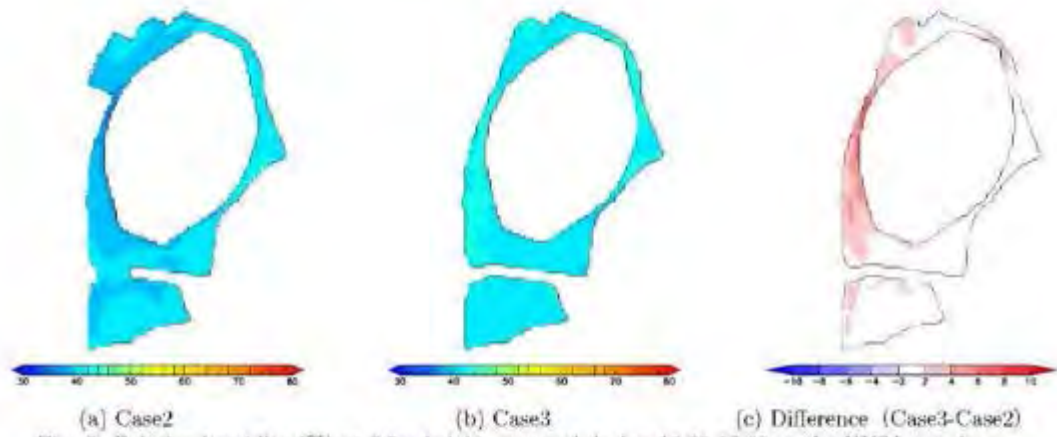


Fig. 8: Relative humidity (%) at 2.5m height averaged during 12:20-12:30 at the NNSJ premises.

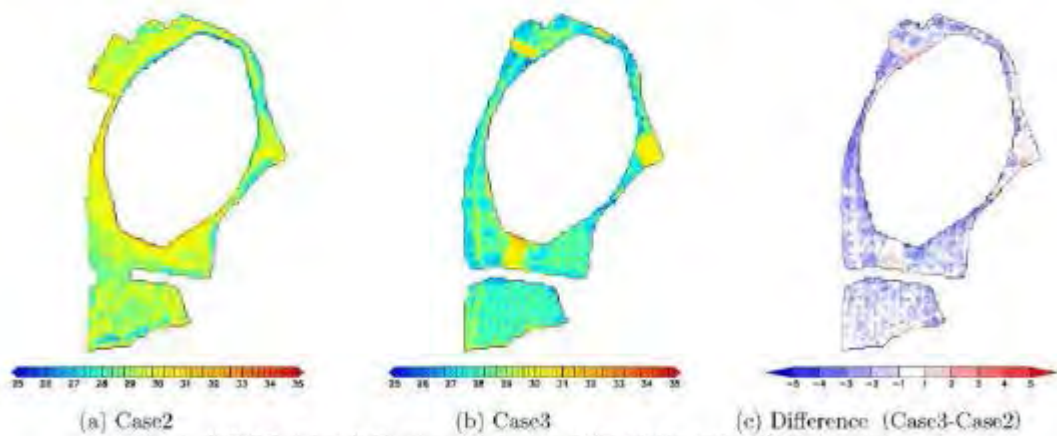


Fig. 9: WBGT index ($^{\circ}\text{C}$) averaged during 12:20-12:30 at the NNSJ premises.