

# 熱環境と風況解析に基づく 大学キャンパスの環境評価と 環境計画への応用

入江彰昭\*<sup>†</sup>・上原拓三\*\*・荒屋 亮\*\*\*・金子忠一\*\*

(平成 29 年 2 月 23 日受付/平成 29 年 7 月 28 日受理)

**要約**：本研究は、熱環境および風環境からみた環境計画手法の確立を目指し、東京農業大学世田谷キャンパスをケーススタディとして、夏季の気象観測から冷涼な緑地を明らかにし、さらに 3 次元 GIS 及び CFD による風のシミュレーションを行うことで風の道を可視化し、熱環境および風環境の面から緑地環境を評価するとともに、世田谷キャンパスの環境評価と環境計画への応用を試みた。その結果、次のことが明らかになった。1) 夏季日中に馬事公苑をはじめケヤキ並木やキャンパス内のメタセコイヤの樹林地が約 2~3℃ の冷涼な緑地であること。2) 夏季日中の南風を正門の樹木群が緩和していること。ケヤキ並木からの南風がキャンパス内にもたらされていないと推察されたこと。3) 冬季日中の北北西の風が 18 号館から剥離しキャンパス内で強風となること。4) 新研究棟等のキャンパス再整備後、夏季日中の南風が新研究棟から剥離した強い風となること。冬季日中の北北西の風が新研究棟北側で強まること。5) 熱環境および風環境解析に基づく新たな環境計画案を評価できることを実証した。本研究で扱ったリモートセンシングによる熱環境のシミュレーション、並びに CFD による風環境のシミュレーションは、環境科学的アプローチによる環境計画手法を向上させるとともに、意思決定、合意形成のツールとして有用であるといえる。

**キーワード**：環境計画、緑地の冷却効果、風の道、GIS、CFD

## 1. 研究の背景と目的

世界気象機関と国連環境計画との協力で設立された「気候変動に関する政府間パネル (IPCC : International panel on Climate Change)」の第 5 次評価報告書 (2013 年 9 月公表) では、人間活動が 20 世紀半ば以降に観測された温暖化の主な要因であった可能性が極めて高いと評価され、気象庁気象研究所の全球 20 km 格子大気モデルでは、温暖化により台風全体の数は減るものの強い台風は増える予想されている<sup>1,2)</sup>。

2013 年 8 月は、東京では 1875 年統計開始以来最も高い日最低気温 30.4℃ を記録し、大阪、名古屋等の大都市においても日最低気温の高い値の記録を更新した。東京の年平均日最低気温は 100 年間で 4.5℃ 上昇し、日最低気温 25℃ 以上の熱帯夜は 10 年間で 3.9 日増加し、熱中症死亡数が増加するなど人々の健康や生活への影響も報告されている<sup>3)</sup>。今日ほど地球環境の気候変動への行動計画的対応、都市環境の高温障害への都市計画的対応が待たれていることはない。ヒートアイランド対策大綱 (2004 年) は 2013 年に見直され、「人工排熱の低減」「地表面被覆の改善」「都市形

態の改善」「ライフスタイルの改善」に加えて「適応策の推進」が追加されたが、適応策の推進に向けた実証的な計画手法ははまだ未確立のままである。

一方、都市の公園緑地の効果の 1 つに気温冷却効果 (Cooling) が知られている<sup>4-6)</sup>。本研究は市街地内部に冷涼な空気を導入する風の道を形成するための緑地計画手法の確立を目指した研究である。ドイツのシュツットガルトにおける風の道による都市環境の改善計画が有名であるが、冷涼な空気を都心部に導くように計画されていた<sup>7)</sup>。また日本の伝統的庭園では南側に池を設けることで日中の南風が水面を通風する際に冷却されその冷風が建築物内にもたらされるように工夫されていた。また関東平野等に見られる農家の庭では冬の北風から母屋を守るようにスギやシラカシ等の屋敷林が防風植栽され、母屋の南側には夏の緑陰と冬の日差しが確保されるようにケヤキ等の落葉広葉樹が植栽され、夏の冷涼、かつ冬の温暖な居住環境を形成し、自然を活かした合理的な環境計画がされてきた<sup>8)</sup>。

本研究では、こうした知見のもと熱環境および風環境からみた環境計画手法の確立を目指し、東京農業大学世田谷キャンパスをケーススタディとして、夏季の気象観測から

\* 東京農業大学短期大学部環境緑地学科

\*\* 東京農業大学地域環境科学部造園科学科

\*\*\* 株式会社環境 GIS 研究所

<sup>†</sup> Corresponding author (E-mail : teruaki@nodai.ac.jp)

冷涼な緑地を明らかにし、さらに3次元GIS及びCFDによる風のシミュレーションを行うことで風の道を可視化し、熱環境および風環境の面から世田谷キャンパスの環境評価と環境計画への応用を試みた。

## 2. 研究の課題と方法

本研究は、都市環境情報を解析し評価するツールとして3次元GIS及びCFD (Computational Fluid Dynamics) による風のシミュレーション解析を行い、風の道を可視化することで、風の道を考慮した効果的な環境計画を評価することを目標としている。

小野寺ら (2013) の研究にみられるようにスーパーコンピュータを活用すれば1m格子解像度の超大規模な気流シミュレーションも可能であるが<sup>9)</sup>、GISなどコンピュータ解析ソフトの普及に伴い、比較的容易にPC上でシミュレーションすることが可能となり、シミュレーション・評価研究が徐々に増えた。佐々木ら (2001) は公園緑地の温熱環境の実測からCFD解析により公園緑地から周辺市街地への冷気流の移流過程を示し<sup>10)</sup>、上野山ら (2013) は3次元GISとCFDによる大阪市都心部 (大梅田地区・中之島地区・御堂筋地区) における風環境とその影響をシミュレーションにて可視化し、堂島川と土佐堀川に挟まれた中洲の超高層ビルが河川を流れる海風を抑え、御堂筋等の市街地に新鮮な風が流れていないことを可視化している<sup>11)</sup>。また高柳ら (2014) は滋賀県大津市都心地区を対象に地表面温度を低減する街路樹の植樹方法・緑化計画の評価・検討ツールとしての風環境シミュレーションを試行している<sup>12)</sup>。喜多山ら (2014) は集合住宅地内の樹木密度の違いによる風のシミュレーション結果を示し、風環境の面から最適な樹木配列を提示している<sup>13)</sup>。さらに、Hsiehら (2016) は、CFDシミュレーションにより台南市の市街地再開発エリアにおける冷涼な空気のコリドーとして可能性のある風の道を明らかにしている<sup>14)</sup>。このように3次元GIS及びCFDを用いることにより比較的容易に対象とする都市環境に効果的な風の道をシミュレーションし、評価することが可能となっている。

一方、村上ら (1984)<sup>15)</sup>、田村ら (2006)<sup>16)</sup>、安部ら (2008)<sup>17)</sup>、藤元ら (2009)<sup>18)</sup> の風洞実験による樹木の防風効果の測定研究もなされ<sup>19-23)</sup>、神山ら (2004) によると風上1m/sに対する樹木風下直後の風速比ではサザンカ約0.4m/s、コブシ約0.5m/s、ナツツバキ約0.8m/sと樹木全体の葉の量である葉面積に比例して風速の減少がみられることが報告されている<sup>24)</sup>。

本研究の対象地である世田谷キャンパスにおいても、建物の高層化によってビル風が発生しており、大型台風到来時には樹木倒木の被害が現れている。2007年9月7日未明の台風9号 (強い・最大風速35m/s) の影響により、南風10.0-10.6m/s (午前1~3時測定、世田谷区役所) を記録し、建物間のケヤキが倒木 (写真1)、2013年10月16日の台風26号 (非常に強い・最大風速45m/s) の影響により、北風10.5m/s (午前6時測定、世田谷区役所) を記録し、経堂門駐車場のポプラが倒木するなど (写真2)、



写真1 2007年9月7日 18号館東通路のケヤキが倒木



写真2 2013年10月16日 経堂門駐車場のポプラが倒木

今後、キャンパスの再整備、建物増築を進めていく上で、樹木による熱環境および風環境の緩和を考慮した環境計画は重要であると考えられる<sup>25)</sup>。

そこで、本研究では東京農業大学世田谷キャンパス及び食と農の博物館、馬事公苑をケーススタディとして、以下の課題を設定した。

(1) 夏季の現地気温調査をもとに緑地からの気温推定により冷涼な緑地を明らかにする。

(2) 3次元GIS及びCFDによる風のシミュレーションを行い風の道を可視化する。

(3) シミュレーション結果をもとに熱環境および風環境の面から現況環境を評価し、環境計画への応用を試みる。

また、本研究は、図2のフローに従って熱環境および風環境の面から現況環境を評価し、計画後の環境を評価する。環境計画前後の風況をシミュレーションすることで比較評価することができ、風環境科学的視点から環境計画の妥当性を検証することが可能である。

## 3. 気温調査および風況解析の方法

### (1) 気温調査方法

調査地点は世田谷キャンパスおよび馬事公苑の南北軸上に12か所を選定し (表1)、気温計 (THERMO RECORDER RT-12 ESPEC MIC CORP のセンサをアルミ箔を巻いた二重塩ビ管内に入れる) を高さ約1.5mに設置した (図1)。

表 1 気温調査地点

調査地点	Latitude(B)	Longitude(L)
① 圃場	35° 38'33.36"N	139° 38'6.74"E
② 水田	35° 38'32.71"N	139° 38'3.49"E
③ グラウンド	35° 38'33.16"N	139° 37'58.87"E
④ 駐車場	35° 38'31.90"N	139° 38'3.97"E
⑤ アリーナ前広場	35° 38'30.28"N	139° 37'53.99"E
⑥ メタセコイヤ樹林	35° 38'26.93"N	139° 38'0.29"E
⑦ 芝生広場	35° 38'26.23"N	139° 37'57.07"E
⑧ 食と農の博物館東	35° 38'20.21"N	139° 37'55.36"E
⑨ 食と農の博物館西	35° 38'20.02"N	139° 37'53.17"E
⑩ 馬事公苑(北)	35° 38'17.97"N	139° 37'53.14"E
⑪ 馬事公苑(南)	35° 38'4.19"N	139° 37'56.21"E
⑫ 馬事公苑(武蔵野林)	35° 38'12.58"N	139° 37'53.24"E

表 2 Airflow Analyst CFD 解析条件の概要<sup>27)</sup>

計算コード:市街地版RIAM-COMPACT(RC-GIS)
乱流モデル:LES
解析手法:非定常解析
離散化手法:差分法
スキーム:補間法
流入条件:べき法則または気候モデルからの内挿補間により作成
流出条件:対流型流出条件
側面境界:滑り条件
上部境界:滑り条件
地表面境界:粘着条件
建物側壁境界:粘着条件
収束判定:RMS誤差=1.0E-3、あるいは最大反復回数100回
抵抗体モデル:外力項として考慮



図 1 気温調査地点

調査期間は 2015 年 8 月 5 日～28 日とし 5 分毎の気温を測定した。

(2) 風況解析方法

風況解析ソフト Airflow Analyst<sup>26)</sup> を使用した。Airflow Analyst (以下 AFA) は、GIS と CFD (Computational Fluid Dynamics) を統合させた風況シミュレーション・エクステンションで、ArcGIS (Arc Map 及び Arc Scene) を使って風況解析を行うことができる。また AFA の機能は風環境の解析に特化しており、屋外環境の風況 (圧力, 拡散, 熱対流などの可視化をすることが可能である。AFA の CFD 解析条件は表 2 の通りで、乱流モデルは CFD の中でも時間や空間変動を直接解析することのできる LES (Large Eddy Simulation) を採用している。AFA の解析は、「地形・建物の用意」、「格子の生成」、「流れの計算」、「結果の可視化」の一連のプロセスで実施する。

(3) 環境計画の評価方法

本研究の目的および課題を達成させるために、以下の研究フローに従った。

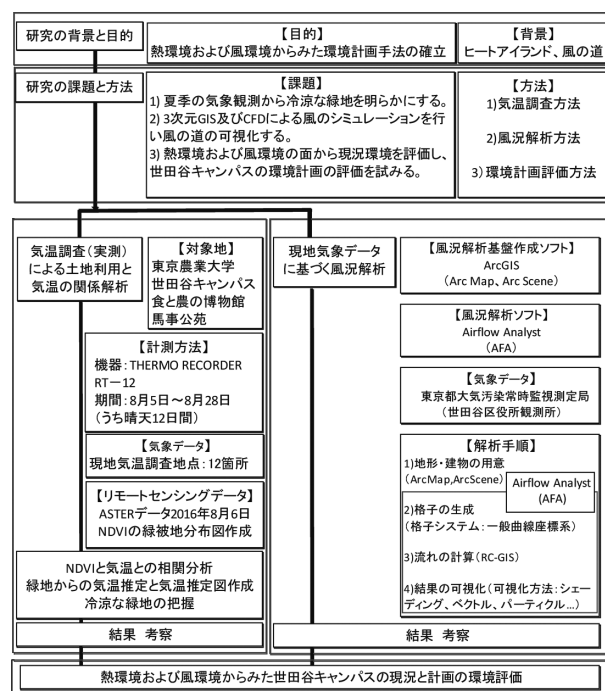


図 2 研究のフロー

4. 結果および考察

(1) 気温調査結果及び考察

気温調査期間のうち晴天日であった 8 月 6 日～9 日, 11 日～12 日, 15 日, 19 日, 21 日～24 日の 12 日間を抽出し、観測された各地点の気温から時刻ごとに前後 5 分の移動平均値を求め、図 3 に 30 分毎の日気温変化を示した。なお調査地点のうち②水田はデータ欠損不良があったので除外した。日中 14 時の気温は、馬事公苑 (武蔵野林) で 30.2℃と最も低く、次いで馬事公苑 (北樹林), 馬事公苑 (南樹林), 食と農の博物館東 (ケヤキ並木), メタセコイヤの樹林地でいずれも約 31.0℃程度であった。一方、圃場, 食と農の博物館西側畑地はともに 33.3℃, 33.4℃とともに最も高く、次いで駐車場, アリーナ前広場, 芝生広場の順に 32.8℃,

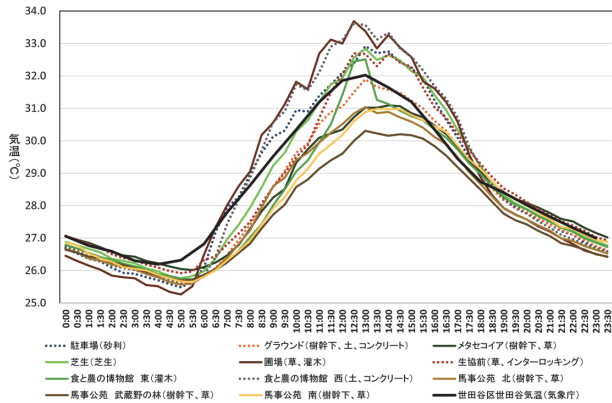


図 3 8月晴天日12日間平均の日気温変化

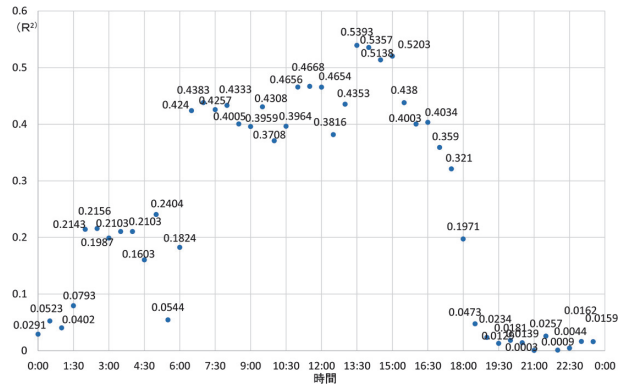


図 6 NDVI (植生指数) と気温の決定係数



図 4 ASTER による False color 画像

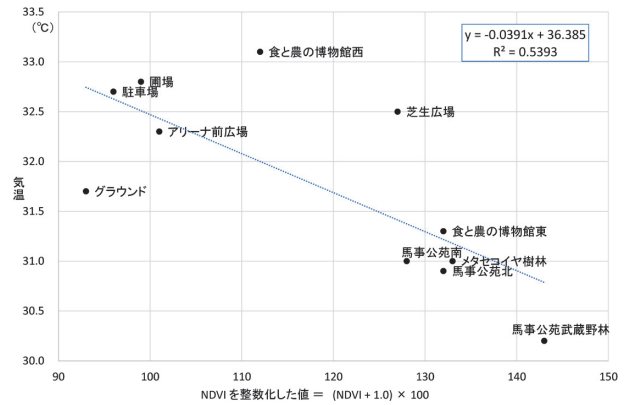


図 7 NDVI (植生指数) と 13 時 30 分時の気温

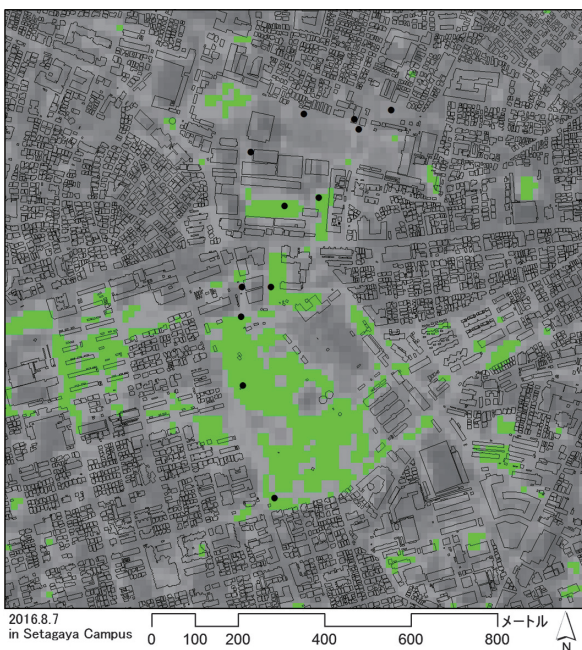


図 5 NDVI (植生指数) による緑被地分布図

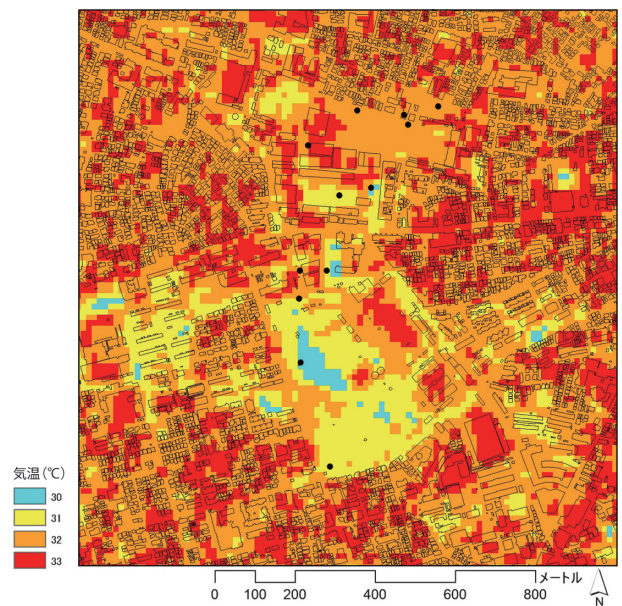


図 8 13 時 30 分時の気温推定図

32.7℃、32.6℃と高く、これら3地点と馬事公苑（武蔵野林）との気温差は2.4～2.6℃であった。また夜間から早朝5時の間は、全調査地点で25～26℃程度で有意差はみられなかった。

## (2) NDVI (植生指数) による気温推定

夏季日中に馬事公苑をはじめとする樹林地の気温が低温を示したことから、クールアイランド化していることが予想される。気温調査地点の土地利用特性から気温推定図を作成し、リモートセンシングを活用し、面的に気温を把握することとした。リモートセンシングを活用し土地利用特性からの気温推定によって、土地利用の変化、すなわち環境計画に伴う気温変化を面的にシミュレーションすることが可能である<sup>28,29)</sup>ことから、本研究では夏季の最も調査年に近い2016年8月7日午前10時前後撮影のASTERデータを利用した。2000年から運用され有償で提供されてきたが、2016年4月1日から無償で提供されるようになり、容易に個人のPC上にダウンロードすることが可能となった。そのため専門家だけでなく多くの自治体や国、市民レベルにおいても、リモートセンシングデータを使用することができ、計画施策の意思決定、防災や環境、農林水産業など広範な分野で利活用できる。

空間分解能15mの画素(Pixel)で構成されBand1-3の色の割り当てによって植物の様子を把握するのが容易なフォールスカラー画像を作成することができる(図4)。ASTERのBand2,3を用いた植生指数NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)を求めることができ、NDVI 0.2以上を緑被とみなし緑被地分布図を作成した(図5)。各気温調査地点のNDVIと30分毎の気温との相関をみると、図6にみられるように日中6時30分から16時まで相関係数 $R^2$ は0.4以上とやや高まり、13時30分時の気温と最も高い相関となった。

佐俣(1994)によるとランドサットによる植生指数(NDVI)と温度との相関を求めヒートアイランド化解析のためのNDVIモデルを構築している<sup>30)</sup>。

そこで図7に示した回帰式を用いてNDVIからの13時30分時の気温の推定を試み、気温推定図を作成した(図8)。

図8から馬事公苑の冷却効果(Cooling)として馬事公苑ケヤキ並木やキャンパス内のメタセコイヤを主とした樹林地においても周辺住宅地よりも2～3℃低い冷温域が現れている。これらのクールアイランド化した緑地相互にネットワーク化を図ることで冷涼な風の道を形成できると考えられる。

## (3) 風況解析結果及び考察

風況解析結果において、解析範囲を広域にとり1707.7m四方、高さ270m(キャンパス内最大建物54mの5倍)とし、計算格子数 $275 \times 275 \times 60 = 4,537,500$ メッシュ、基本格子幅3m、固定幅格子数50、格子幅増加率1.020、格子高さ2.89mと設定した。キャンパス及び周辺建物、樹木の高さデータを現地調査により3次元GISを作成した。風況解析に用いる気象データは、東京都大気汚染常時監視

測定局の世田谷区役所観測所(風速計設置高31m)における夏季8月14時の平均風速2.6m/s、最多風向S、冬季1月14時の平均風速3.4m/s、最多風向NNWのデータを使用した。またこれまでの樹木の防風効果研究<sup>24)</sup>を踏まえ、樹木透過率は0.7とした。

### a) 夏季日中の南風のシミュレーション

流入風速2.6m/sの南風における風況解析を行ったところ、世田谷キャンパス(現況建物)の風のシミュレーション結果は図9、図10となった。

図9より馬事公苑からの南風が、ケヤキ並木を通りキャンパス内の建物(8号館・アイソトープセンター・15号館・10号館・11号館)にぶつかり、キャンパス内に風は届かず世田谷通り上で放射、拡散、渦巻き風の動きがみられた。一方、馬事公苑からの南風が、図中の建物A(11階建て)の剥離流が建物B(6階建て)との間の狭いスペースに流れ込み、速度が4.2m/sにまで増加しキャンパスに流入していく風の流れが確認された。キャンパスでは正門から流入した南風が旧本部棟と2号館との間を通り、アカデミアセンターと2号館との間、アカデミアセンターと1号館との間では谷間風となって強い南風3～4m/sがみられた。13号館前芝生広場では3方向(旧本部棟側、12号館と百周年記念講堂との間、百周年記念講堂と18号館との間)から流入してきた南風がぶつかり合い、放射、拡散、渦巻き風の動きがみられ、13号館建物に沿って東から西へ最大風速4.2m/sの風の流れが確認された。また南風が18号館にぶつかり建物角部で生じた剥離流の風が13号館・7号館との間に流れこみ7号館前で最大風速4.2m/sにまで増大している様子がみられた。

さらに図10により鉛直方向の風の流れが可視化され南風がキャンパス内の建物にぶつかり吹き降ろしの風となって地面に到達し、渦巻き、拡散している風の流れが確認された。

次に世田谷キャンパスの現況建物に既存樹木をモデル化して追加したケース(以下、現況建物・樹木と表現)の風のシミュレーション結果は図11、図12となった。図9と図11を比較検証することで樹木による防風効果をみることができる。特に図12にみられるように建物Aで生じた剥離流の風が建物Bとの間を通り強まった風の流れが正門の3本のヒマラヤスギ、クロマツ、クスノキ、ソメイヨシノ、ケヤキなどの樹木によって緩和され、キャンパス内では風が弱まっていることがわかる。つまり夏季日中の南風に対して、現状の正門の樹木群が重要な役割を果たしていることがわかった。一方、風環境改善の課題として、馬事公苑ケヤキ並木からの冷涼な南風が建物に遮られキャンパス内にもたたらされていないと考えられた。

また、これら図9、図11の現況のシミュレーション結果から写真1の倒木がみられた日の気象条件における現場の風速を想定すると、現況建物のみモデルでは風速16.1m/s、現況建物・既存樹木のモデルでは風速11.2m/sとなった。日本風工学会「瞬間風速と人や街の様子との関係」によると平均風速10m/s以上15m/s未満の「やや強い風(気象用語)」では瞬間風速は20m/sで、風に向かって歩けず樹

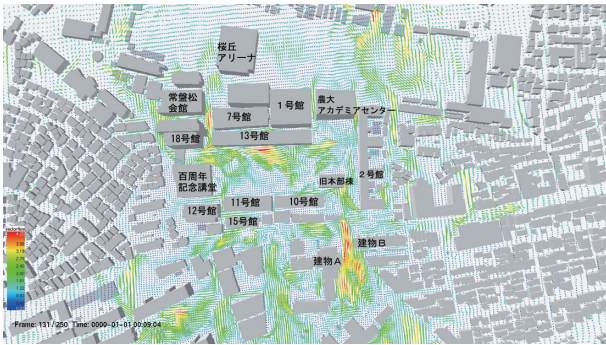


図 9 南風 2.6 m/s 時の風の流れ (現況建物)  
シミュレーション風速結果：最小 0.03 m/s 最大 4.2 m/s

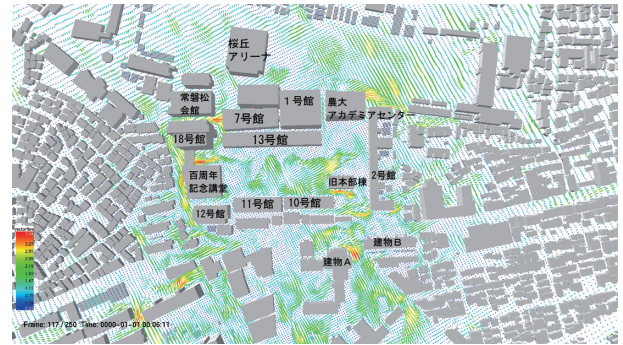


図 13 北北西 3.4 m/s の風の流れ (現況建物)  
シミュレーション風速結果：最小 0.03 m/s 最大 3.84 m/s

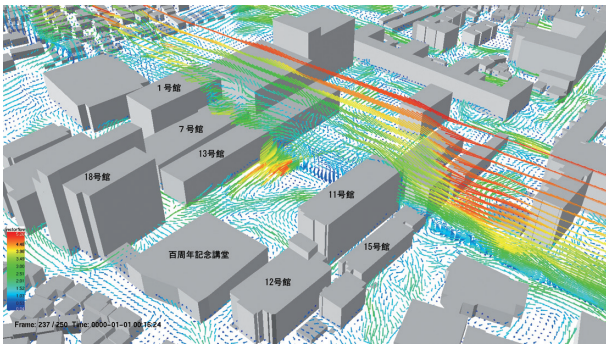


図 10 南風 2.6 m/s の風の流れ断面 (現況建物)  
シミュレーション風速結果：最小 0.04 m/s 最大 5.26 m/s

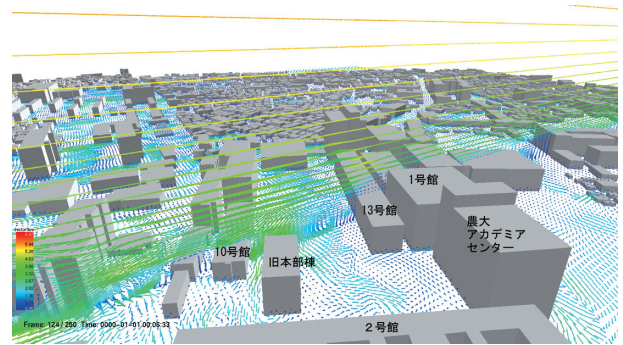


図 14 北北西 3.4 m/s の風の流れ断面 (現況建物)  
シミュレーション風速結果：最小 0.05 m/s 最大 6.97 m/s



図 11 南風 2.6 m/s の風の流れ (現況建物・樹木)  
シミュレーション風速結果：最小 0.02 m/s 最大 2.91 m/s

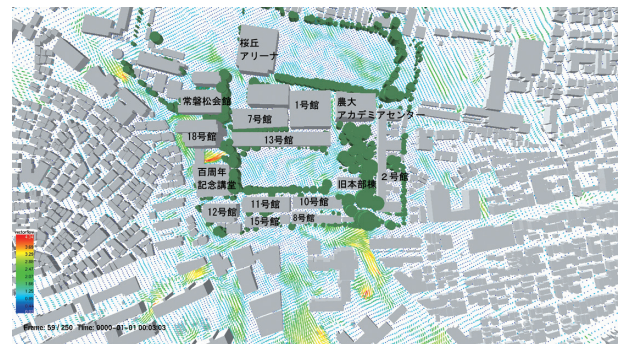


図 15 北北西 3.4 m/s の風の流れ (現況建物・樹木)  
シミュレーション風速結果：最小 0.03 m/s 最大 4.34 m/s

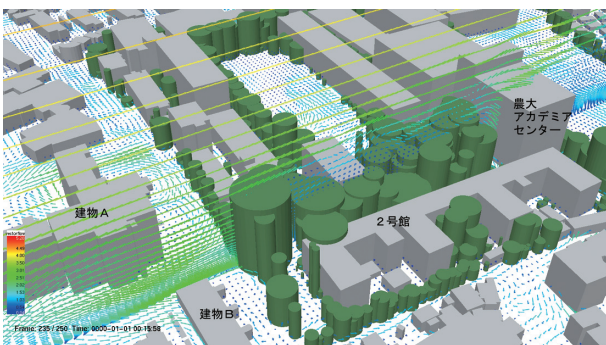


図 12 南風 2.6 m/s の風の流れ断面 (現況建物・樹木)  
シミュレーション風速結果：最小 0.04 m/s 最大 5.26 m/s

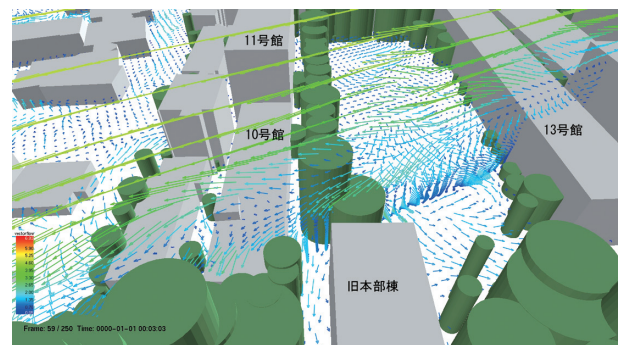


図 16 北北西 3.4 m/s の風の流れ断面 (現況建物・樹木)  
シミュレーション風速結果：最小 0.05 m/s 最大 6.93 m/s

木全体が揺れるといわれていることから<sup>31)</sup>、写真1の倒木記録からシミュレーション結果との整合性・妥当性を検証することができる。

#### b) 冬季日中の北北西の風のシミュレーション

流入風速3.4m/sの北北西の風における風況解析を行ったところ、世田谷キャンパス（現況建物）の風のシミュレーション結果は図13、図14となった。

図13より千歳通りからの北北西の風が18号館の建物角部におつかり分流し、18号館と常盤松会館との間で谷間風となって風速が増加していく様子が確認された。さらにその風速の増した谷間風が7号館におつかり拡散し、一部の風は野球場側から流入してきた風と合流し、18号館と13号館との間を通り芝生広場へ流れていくことがわかった。また分流したもう一方の風は18号館西側の建物角部で剥離し、百周年記念講堂との間を通り、風速を増大させ芝生広場に流入していくことがわかった。

芝生広場内の集まった風は11号館と10号館におつかり西から東へ移流し、剥離した風が風速を増して旧本部棟との間を流れていく様子が確認された。またグラウンド側から流入してきた風が1号館とアカデミアセンターにおつかり、建物にそって西から東へ移流し、建物角部で剥離した風が風速を増大して経堂門方面に流れていく様子がみられた。さらに図14により鉛直方向の風の流れが可視化され、10号館におつかり吹き降ろしの風となって地面に到達し、拡散して旧本部棟との間に向かって流れていく風が確認された。

次に世田谷キャンパス（現況建物・樹木）の風のシミュレーション結果は図15、図16となった。図13と図15を比較した結果、百周年記念講堂東側のケヤキ、10号館前のヒマラヤスギ、グラウンド南側のサクラ並木など樹木による防風効果をみることができた。しかし一方で課題として、図13、15ともに18号館から剥離した風の影響がみられ、18号館北西側での風緩和のための樹木による防風植栽が重要であると考えられる。

また、これら図13、図15の現況のシミュレーション結果から写真2の倒木がみられた日の気象条件における現場の風速を想定すると、現況建物のみモデルでは風速11.85m/s、現況建物・既存樹木のモデルでは風速9.26m/sとなった。現況建物・既存樹木のモデルでは風速10m/s以下ではあるものの、日本風工学会「瞬間風速と人や街の様子との関係」によると平均風速10m/s以上15m/s未満の「やや強い風（気象用語）」では瞬間風速は20m/sで、風に向かって歩けず樹木全体が揺れるといわれていることから<sup>31)</sup>、写真2の倒木記録からシミュレーション結果との整合性・妥当性を検証することができる。

#### (4) 緑による熱および風環境を考慮した環境計画の評価

これまでの研究課題に対する結果および考察より、夏季の熱環境の改善に向けて馬事公苑をはじめクールアイランドを示す緑地のネットワーク化を図り世田谷キャンパス内に冷涼な空気を導入する風の道の形成が有効であることが考えられた。また、風の可視化によって風環境の改善に向

けて樹木による防風効果を活かした環境計画が有効であると考えられた。

そこで、新研究棟等のキャンパス整備計画が進む世田谷キャンパスにおいて樹木による熱環境および風況対策の環境緩和機能を活かした緑地環境計画の評価を試みた。

#### a) 夏季日中の南風のシミュレーション（再整備後）

新研究棟等の世田谷キャンパス整備計画では、新研究棟（7階建て）が建設され、既存建物の2号館・7号館・10号館・11号館・13号館・旧本部棟が取り壊され、緑地スペースになる整備計画が進んでいる。そこで整備計画後の世田谷キャンパスに既存樹木をモデル化したケース（以下、計画建物・現況樹木と表現）において、前述同様の風況解析範囲、計算格子数、基本格子幅、固定幅格子数、格子幅増加率、格子高さ、樹木透過率に設定し、流入風速2.6m/sの南風の風況解析を行ったところ、風のシミュレーション結果は図17、図18となった。

図11の現状と図17を比較すると、南風が新研究棟におつかりその建物角部からの剥離した風は、風速を増して1号館におつかり建物南面を東から西にむかって強く流れていくことが確認された。また図18により鉛直方向の風の流れが可視化され、南風が新研究棟におつかり、11号館跡地のオープンスペースで吹き降ろし・渦巻き・逆風・拡散することが確認された。

つまり夏季の日中南風に対して、新研究棟の剥離流の緩和、1号館南側で生じる風の緩和、新研究棟南側で生じる吹きおろし風の緩和が課題であるといえる。

#### b) 冬季日中の北北西の風のシミュレーション（再整備後）

次に世田谷キャンパス（計画建物・現況樹木）において、流入風速3.4m/sの北北西の風の風況解析を行ったところ、風のシミュレーション結果は図19、図20となった。図15の現状と図19を比較すると、7号館跡・13号館跡のオープンスペースには3方向（野球場側・常盤松会館と18号館との間・18号館と百周年記念講堂との間）から流入してきた風が合流し、風速が強まって新研究棟に沿って西から東へ流れる風が生じることが確認された。また図20により鉛直方向の風の流れが可視化され、北北西風が新研究棟におつかり、吹き降ろし、建物に沿って東へ向かって流れることが確認された。

つまり冬季の日中北北西の風に対して、新研究棟北側のオープンスペースに流入してくる風の緩和と新研究棟北側で生じる吹きおろし風の緩和が課題であるといえる。

#### c) 熱・風環境を考慮した環境計画の評価

図17や図19にみられるような新研究棟をはじめ建物角地からの剥離流による風の強まりを緩和させるには、建物の角地部分を丸みづけるように樹木を配置し、樹木の防風効果を活かした環境計画が有効である。また一方で南からの風の道を活かし馬事公苑からキャンパス内の緑地までネットワーク化を図ることで熱環境の緩和に資する環境計画も可能である。

そこで新研究棟南側に夏の緑陰、冬の日差しが得られるように樹冠の広いケヤキやサクラなどの落葉広葉樹を主体

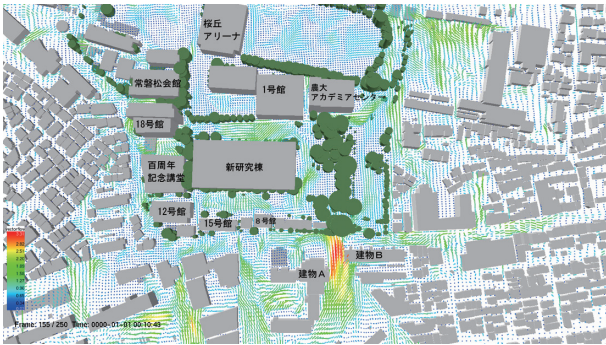


図 17 南風 2.6 m/s の風の流れ (計画建物・現況樹木)  
シミュレーション風速結果：最小 0.03 m/s 最大 3.31 m/s

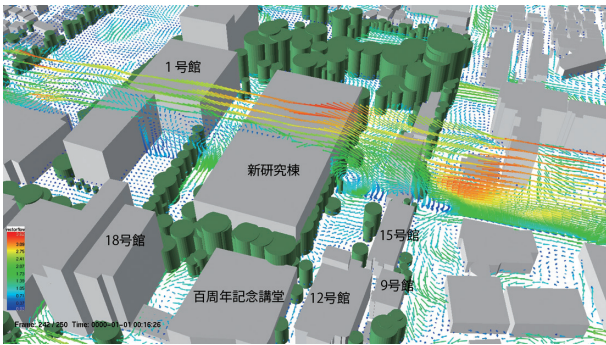


図 18 南風 2.6 m/s の風の流れ断面 (計画建物・現況樹木)  
シミュレーション風速結果：最小 0.03 m/s 最大 3.62 m/s

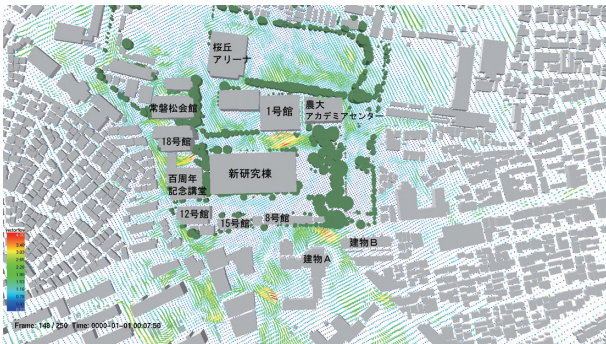


図 19 北北西 3.4 m/s の風の流れ (計画建物・現況樹木)  
シミュレーション風速結果：最小 0.03 m/s 最大 4.00 m/s

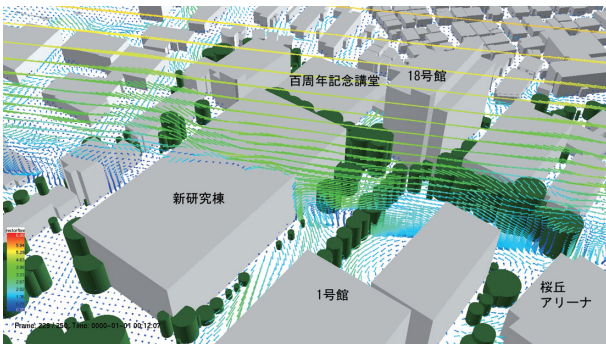


図 20 北北西 3.4 m/s の風の流れ断面 (計画建物・現況樹木)  
シミュレーション風速結果：最小 0.05 m/s 最大 6.98 m/s



図 21 熱・風環境を考慮した環境計画のプラン  
(現況樹木：濃緑、計画樹木：薄緑・桃色)

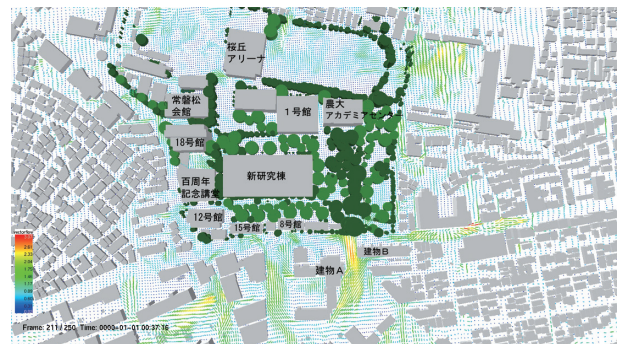


図 22 南風 2.6 m/s の風の流れ (計画建物・計画樹木)  
シミュレーション風速結果：最小 0.02 m/s 最大 3.07 m/s



図 23 北北西 3.4 m/s の風の流れ (計画建物・計画樹木)  
シミュレーション風速結果：最小 0.03 m/s 最大 4.16 m/s

とした樹林スペースを設け、剥離流の風を緩和し受け流すように風上側の建物角部後方に常緑樹を主とした樹林を配置する環境計画のプランを作成した(図 21)。

これまでの風況解析条件と同様に夏と冬の風のシミュレーションを行い、計画案の風環境面からみた評価を試みた(図 22, 23)。



夏季日中の南風のシミュレーションの結果、図 22 と図 17 において課題であった新研究棟から生じる剥離流の風、1号館南側で生じる風は緩和される結果となった。また新研究棟南側の樹林スペースでは風が乱れず穏やかな風の流れであることから、ケヤキ並木との緑のネットワークが図られることで馬事公苑からの冷涼な南風がキャンパス内にもたらされると予想される。

冬季日中の北北西の風のシミュレーションの結果、図 23 より、図 19 において課題であった新研究棟北側で生じる風は緩和される結果となった。また図 15 において課題であった 18号館北西側に樹木による防風植栽をすることで風が緩和されていた。

## 5. まとめ

本研究は、熱環境および風環境からみた環境評価手法の確立を目指し、世田谷キャンパスをケーススタディとして、夏季の気象観測から冷涼な緑地を明らかにし、3次元 GIS 及び CFD による風のシミュレーションを行うことで風の道を可視化し、風環境の面からキャンパス環境を評価した。さらにその評価結果を活かした環境計画案を作成し、環境評価を試みた。

その研究成果は以下の通りである。

- 1) 夏季日中において馬事公苑の冷却効果が最も強く、馬事公苑前ケヤキ並木やキャンパス内のメタセコイヤを主とした樹林地においてもスポット的に約 2~3°C の低温域がみられた。これらのクールアイランド化した緑地相互にネットワーク化することで世田谷キャンパス内に冷涼な空気を導入する風の道を形成することができると考えられた。
- 2) 夏季日中の南風に対して、正門の樹木群が南風を緩和し重要な役割を果たしている。一方馬事公苑ケヤキ並木からの冷涼な南風が建物に遮られキャンパス内にもたらされていないと考えられた。
- 3) 冬季日中の北北西の風に対して、18号館から剥離した風がキャンパス内で強風となるため、18号館北西側での風緩和のための環境計画が重要と考えられた。
- 4) 新研究棟等のキャンパス再整備後、夏季日中の南風に対して、新研究棟の剥離流の緩和、1号館南側で生じる風の緩和、新研究棟南側で生じる吹きおろし風の緩和が課題であると考えられた。冬季日中の北北西の風に対して、新研究棟北側のオープンスペースに流入してくる風の緩和と新研究棟北側で生じる吹きおろし風の緩和が課題であるといえる。
- 5) 最後に 1~4) の熱環境および風環境解析による成果を活かし、新たな環境計画案を評価できることを実証した。

本研究で扱ったリモートセンシングによる熱環境のシミュレーション、並びに CFD による風環境のシミュレーションは、環境科学的アプローチによる環境計画手法を向上させるとともに、意思決定、合意形成のツールとして有用であるといえる。

今後、本研究では地形データを設定したシミュレーショ

ン解析を試みることで、キャンパス内の風の実測調査をおこない本研究で示されたシミュレーションの結果と比較評価し、信頼性を高めたいと考えている。

一方、本論のように熱環境はマクロスケールでとらえラスタデータによる平面での解析・シミュレーションとなり、風環境ではメソスケールでとらえベクターデータでの解析・シミュレーションとなる。これらのスケールおよびデータの連携を図るケーススタディによる実証的な研究を継続し、アジアモンスーン地域独自の環境計画モデルを開発していくことが今後の課題である。

大規模な都市開発により都市環境問題の著しいアジアモンスーン地域では、都市温暖化に限らず都市洪水、大気汚染等の気候変動に対する適応及び緩和策の統合的アプローチが課題となっている。アジア地域では豊富な降水量による気候風土のもと水田環境をはじめとする里山や屋敷林等、自然を合理的に活かした環境計画がされてきた。今後、アジアモンスーン型の環境計画を考える上で、広域的に都市・地域環境の把握が可能な衛星データを利用し、都市環境を解析・シミュレーションする本研究は大いに貢献できると考えている。

**謝辞:** 本研究を進めるにあたり、気温調査、建物高さ調査、樹木倒木写真、樹木調査では JRA 馬事公苑の方々、東京農業大学「食と農」の博物館、施設課及び環境管理課、学生課の方々、環境緑地学科緑地建設・植栽学研究室の学生の皆さんにご協力いただいた。ここに心よりお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 気象庁地球環境・海洋部気候情報課 (2013) 地球温暖化予測情報第 8 巻
- 2) 気象庁気候研究部 (2008) 地球温暖化の基礎知識 22
- 3) 気象庁 (2015) ヒートアイランド監視報告 2014
- 4) T.R. OKE (1989) The micrometeorology of the urban forest *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 324 : 335-349
- 5) SANDRA Oliveira, HENRIQUE Andrade, TERESA Vaz (2011) The cooling effect of green as a contribution to the mitigation of urban heat : A case study in Lisbon *Building and Environment* 46 : 2186-2194
- 6) CHRISTOPHER W. Mackey, XUHUI Lee, RONALD B. Smith (2012) Remotely sensing the cooling effects of city scale efforts to reduce urban heat island *Building and Environment* 49 : 348-358
- 7) 一ノ瀬俊明 (1993) シュトゥットガルトにおける「風の道」: 都市計画で都市気候を制御する試み *天気* 40 (9), 691-693
- 8) 江山正美 (1977) スケープテクチュア 245
- 9) 小野寺直幸, 青木尊之, 下川辺隆史, 小林宏充 (2013) 格子ボルツマン法による 1m 格子を用いた都市部 10km 四方の大規模 LES 気流シミュレーション ハイパーパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム 123-131
- 10) 佐々木澄, 吉野 博, 持田 灯, 渡辺浩文, 大岡龍三, 宮田敏雄 (2001) 都市内公園緑地の暑熱緩和効果に関する研究—公園緑地から周辺市街地への冷気の流出に関する屋外実測と CFD 解析— 日本建築学会東北支部研究報告会 95-98
- 11) 上野山明良, 村橋正武 (2013) 3次元シミュレーションに

- よる風の道に関する研究—大阪市都心部におけるケーススタディー—都市計画論文集 Vol. 48 No. 3 p 921-926
- 12) 高柳英明, 木原己人, 栗田陽介 (2014) 滋賀県大津市における地表温度を低減する「風の道」創造に向けた樹木—風環境シミュレーションと緑化計画・植樹方法の検討—日本建築学会技術報告集 第20巻 第44号 p 251-255
  - 13) 喜多山空人, 木原己人, 高口洋人 (2014) 都市内緑地における計画手法の確立を目指した環境評価 日本建築学会学術講演梗概集 p 857-858
  - 14) CHUN-MING Hsieh, HSIN-CHIAO Huang (2016) Mitigating urban heat islands : A method to identify potential wind corridor for cooling and ventilation *Computers, Environment and Urban Systems* 57 : 130-143
  - 15) 村上周三, 又木義浩, 島田 洋, 高倉秀一 (1984) 風洞実験に用いる樹木模型の風速低減効果 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 271-272
  - 16) 田村 大, 河野 仁 (2006) 樹木後流のCFDシミュレーションと風洞実験比較 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 643-644
  - 17) 安部 剛, 布引英夫, 半貫敏夫 (2008) 単体樹木の防風効果に関する基礎的研究 その2 解析と実験の比較, 実スケールでの防風効果の検証 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国) 803-804
  - 18) 藤元栄行, 中村 修, 植松 康, 宮下康一, 猿川 明, 赤星明紀 (2009) 都市域における樹木の防風効果について 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北) 111-112
  - 19) 神山健二, 成田健一, 大橋征幹 (1999) 樹木の抵抗係数に関する風洞実験 その1 樹種および気流の違いによる比較 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国) 521-522
  - 20) 大橋征幹, 神山健二, 成田健一 (1999) 樹木の抵抗係数に関する風洞実験 その2 抵抗係数の算出と数値シミュレーション 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国) 521-522
  - 21) 神山健二, 大橋征幹, 成田健一 (2000) 樹木の抵抗係数に関する風洞実験 その3 葉面積密度と抵抗係数の関係 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北) 667-668
  - 22) 大橋征幹, 神山健二, 成田健一 (2000) 樹木の抵抗係数に関する風洞実験 その4 乱流モデルの比較 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北) 669-670
  - 23) 布引英夫, 安部 剛, 半貫敏夫 (2008) 単体樹木の防風効果に関する基礎的研究 その1 風洞実験と数値流体解析概要 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国) 801-802
  - 24) 神山健二, 大橋征幹, 成田健一 (2004) 葉面積密度を代表面積とした樹木の抵抗係数に関する風洞実験 日本建築学会環境系論文集 第578号 p 71-77
  - 25) 中村 修 (2009) ビル風と安全・安心 総合論文誌 No. 7 p 69-72
  - 26) 内田孝紀, 荒屋 亮 (2012) 福岡市街地を対象とした大規模数値風況予測 九州大学応用力学研究所所報 第142号 55-62
  - 27) 株式会社環境 GIS 研究所 (2015) Airflow Analyst 操作マニュアル Ver. 1.4 32
  - 28) 入江彰昭 (2003) 気温推定による緑地のヒートアイランドの緩和効果に関する研究 ランドスケープ研究 Vol. 66 No. 5 890-892
  - 29) 入江彰昭 (2006) ランドサットデータをベースとしたヒートアイランドの緩和に資する緑地の配置の評価手法に関する研究 都市計画論文集 No. 41-3 355-360
  - 30) 佐俣満夫 (1994) 都市での植生指標を用いたヒートアイランド現象解析のためのNVIモデル—人工衛星データによるモデル化— 横浜市環境科学研究所報第18号, 21-26
  - 31) 日本風工学会 (2016) 瞬間風速と人や街の様子との関係 Ver. 2.0 (2016/3/17) <https://jawe.jp/images/gust/gusttable.pdf>

# Simulating Thermal and Wind Dynamics to Aid Environmental Planning : Case Study for a Planning of Setagaya Campus of TUA

By

Teruaki IRIE\*<sup>†</sup>, Takumi UEHARA\*\*, Ryo ARAYA\*\*\* and Tadakazu KANEKO\*\*

(Received February 23, 2017/Accepted July 28, 2017)

**Summary** : This study aims to demonstrate how simulated thermal and wind dynamics can be integrated into urban environmental planning. Three dimensional GIS and CFD simulations were employed to investigate the effects of green space and wind flows on urban cooling, using a plan of Setagaya campus of TUA as a case study. We evaluated the current configuration of the campus in relation to its thermal environment and wind conditions and showed that 1) summer daytime temperatures in a green space area for Bajikouen, an avenue of Zelkova and a grove of Metasequoia were 2-3 degrees Celsius lower than urban areas within the campus ; 2) trees near the main gate help mitigate southerly wind speeds, and a campus building along Setagaya Street shelters the Bajikouen area and the Zalkova avenue from the same southerly wind ; 3) north-westerly winds are split after striking building No. 18, resulting in high winter daytime wind speeds ; 4) split wind flows from the south, striking a newly constructed research building, resulted in high summer daytime winds. Finally we evaluated proposed campus redevelopment plans on the basis of thermal and wind dynamics, demonstrating how the simulation of the thermal environment from remotely sensed data and of wind dynamics through CFD can improve environmental planning in urban areas to the benefit of civil society.

**Key words** : Environmental planning, cooling of urban green space, wind dynamics, Geographical Information System (GIS), Computational Fluid Dynamics (CFD)

---

\* Department of Environment and Landscape, Junior College, Tokyo University of Agriculture

\*\* Department of Landscape Architecture Science, Faculty of Regional Environment, Tokyo University of Agriculture

\*\*\* Environmental GIS Laboratory Co., Ltd.

<sup>†</sup> Corresponding author (E-mail : teruaki@nodai.ac.jp)