都市内緑地とその周辺における気温と湿度の鉛直・水平構造特性

Vertical and Horizontal Structure of Air Temperature and Humidity in Urban Park Forest and its Surrounding

加藤拓磨[1]・手計太一[2]・山田正[3]・日野幹雄[4]
Takuma KATO, Taichi TEBAKARI, Tadashi YAMADA and Mikio HINO

[1]学生員　中央大学大学院　理工学研究科　土木工学専攻　博士後期課程（〒112-8551　文京区春日 1-13-27）
[2]正会員　工修　独立行政法人土木研究所　ユネスコセンター　JST/CREST（〒305-8516　つくば市南原 1-6）
[3]フェロー会員　工博　中央大学　理工学部　教授（〒112-8551　文京区春日 1-13-27）
[4]正会員　工博（〒251-0033　神奈川県藤沢市片瀬山 4-20-6）

In order to the mitigation effect on urban heated environment of urban park, the microclimate observations have been carried out in an urban park and its surrounding in Tokyo since 1998. We have installed the 17m height observation tower with the sensors to measure air temperature and humidity at each 2m within the forest during 1st-30th July 2005. And also 19 measurement systems for air temperature and humidity were installed inside and outside the forest. As a result, the existence of clearly high- temperature and humidity layers were caught in canopy layer during the daytime. This means the exchanges of latent and sensible heat were very active in the canopy layer. In night, specific humidity near the ground was higher than that of upper layer because of continued evaporation from the ground surface. Moreover, when the flux of solar radiation was less than 300W/m^2 (e.g. cloudy day and nighttime), air temperature inside the forest was lower than outside the forest; maximum difference was 5 degrees Celsius. However, there was stark difference air temperature between inside and outside the forest during the sunshine daytime. We can not clearly identify the mitigation effect on urban heated environment of urban park in this field observation.

Key Words: *vertical structure, air temperature, humidity, urban forest, microclimate, heat island*

１．はじめに

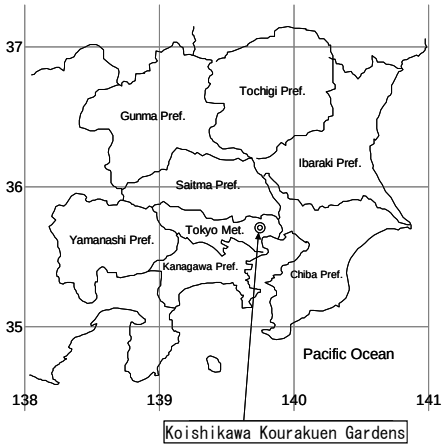
二酸化炭素排出を主因とする地球温暖化現象により全球の気温が上昇し，集中豪雨や干ばつが局地化するというのは多くの科学者の共通の認識になりつつある．気温の上昇は雪解け量の増加による海面の上昇など地球規模で気候環境が変化する可能性が指摘されている．

特に，都市・市街部では地表面状態の変化や人間活動によって，気温が全球平均よりも急激に上昇している．このようなヒートアイランド現象は積乱雲の発達を加速化させ，集中豪雨の増加を引き起こしているという指摘もある．

一方で，アスファルトやコンクリートで覆われた都市を，例えば屋上緑化やポケットパークを設置し，アルベドを変化させようという試みは政府・自治体が行っている．さらに，かつての河川を復活させようという活動や打ち水をして気温上昇を抑えようという活動も活発に行われている．このような都市の熱環境を緩和させる作用として，水辺や森林が大きな役割を果たしていると考えられているが，それらの定量的な評価は非常に困難であるのが実情である．

既往の研究例として，神田ら [1)]が東京都渋谷区にある明治神宮の森を対象に熱環境緩和作用の評価を行う目的で微気象観測や植物生理観測を行っている．その結果，森全体から放出される潜熱 flux が全エネルギーの 70 から 80%程度を占め，水蒸気を大量に放出していることを明らかにした．また，三上ら [2)]は新宿御苑において，同様の目的で気象観測を行い，特に緑地からの冷気の滲み出し効果について報告している．

本研究は都市内緑地の微気象環境を明らかにし，それらの持つ熱環境緩和作用を定量的に明らかにすることを目的としている．特に本稿では，都市内緑地の気温と湿度の鉛直構造特性と緑地とその周囲における気温と湿度の水平分布の特徴について報告する．また，今日の可視



図－1　小石川後楽園の位置図

化技術の発達を利用して，森林内の気温と湿度の鉛直構造を「時間」を軸とした濃淡図を作成し，森林内微気象の構造の理解を深めた．さらに，「都市」という特殊な環境における樹木群落内の温湿度環境についても，1998 年から 2005 年までの夏季気象観測の結果から議論する．

２．観測と衛星データの概要

(1)　観測場所

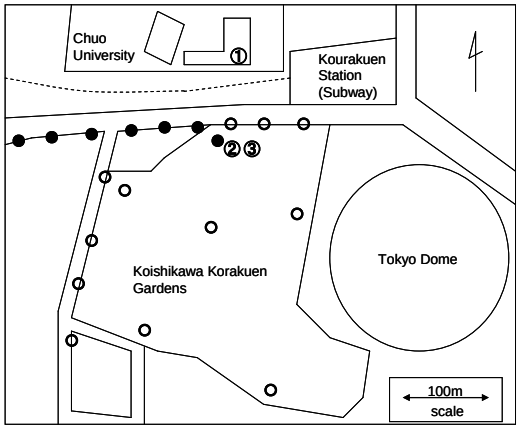
観測を行ったのは，東京都文京区に位置する小石川後楽園内の樹木群落である（**図－1**）．研究対象とした小石川後楽園は，皇居から直線距離で約 2 キロ離れたところに位置し，オフィス街の真中に位置する．現在，文化財保護法によって特別史跡・特別名勝に指定されている．面積は 70847.17 ㎡，中央部に池があり，その周囲を樹木が覆っている．水は地下水を汲み上げ，流水させている．

図－2 は小石川後楽園とその周辺の図である．小石川後楽園は，東面に東京ドーム，北面は道路と鉄道，西面は比較的背の低いビル，南面は高いビルに囲まれており、いわば熱の海に浮かぶ緑の島である．観測した樹木群は落葉樹（ムクノキ，ケヤキ），常緑広葉樹（シイノキ，クス）などが混在し，どの植物も樹高は 15mから 16m 程度である．小石川後楽園内の観測ポイントは，**図－2** 中の②である．ここは，道路境界から 10m 離れている地点である．小石川後楽園周辺道路は街路樹が並んでいる．

(2)　観測期間

著者らは 1999 年から 2005 年までの毎夏(2003 年を除く), 前述の園内において微気象観測を行った. **表－1** に，各年における観測期間と観測日数を示す. 主に 7 月から 8 月にかけて観測を行っている．本稿では，上述の観測期間の中で，連続的に長く測定結果が得られている 2001 年と 2005 年の観測結果について主として示す．

(3)　観測項目



図－2　小石川後楽園とその周辺の図

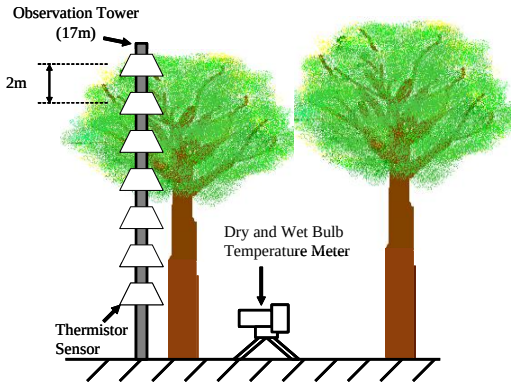
表－1　これまでの観測期間とその日数

Year	Date	Days
2005	1-31,July	31
2004	27,July-16,August	21
2002	19-30,July	12
2001	19,July-10,August	22
2000	21-28,August	8
1999	6-21,August	16

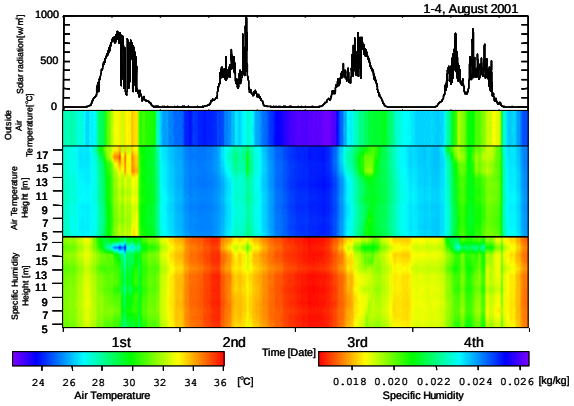
表－2　観測機器と項目の一覧

Item	Observation Instrument	Measuring Place
Forest Surface Temperature	Infrared Radiation Thermometer (NEC San-ei.Co.)	①
Temperature & Humidity	Dry and Wet Bulb Themometer (EKO Instruments Co.)	①②
Wind Velocity	Propeller Anemometer (Young Co.)	①
Global Solar Radiation	Pynanometer (EKO Instruments Co.)	①
Wind Velocity	Ultrasonic Anemometer (Young Co.)	②
Net Radiation	Net Radiometer (EKO Instruments Co.)	②
Soil Heat	Heat Sensor (EKO Instruments Co.)	②
Temperature & Humidity	Themistor Sensor (Onset Computer Co.)	②③○
Wind Velocity	Hot Wire Amemometer (Shibaura Electronics Co.)	②
CO2	CO2 Monitor (ADC Co.)	②

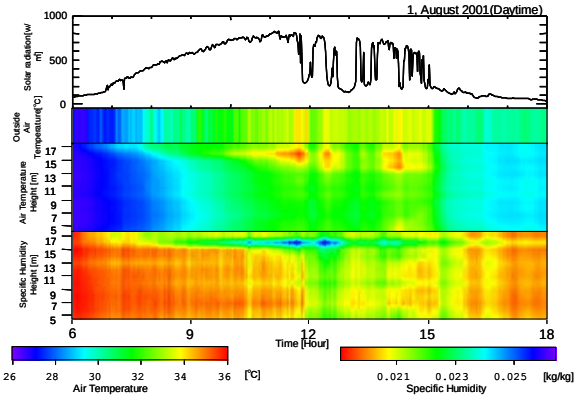
①: Chuo University　②: Forest Bed　③: Forest Canopy　○: Altitude of 1.5m



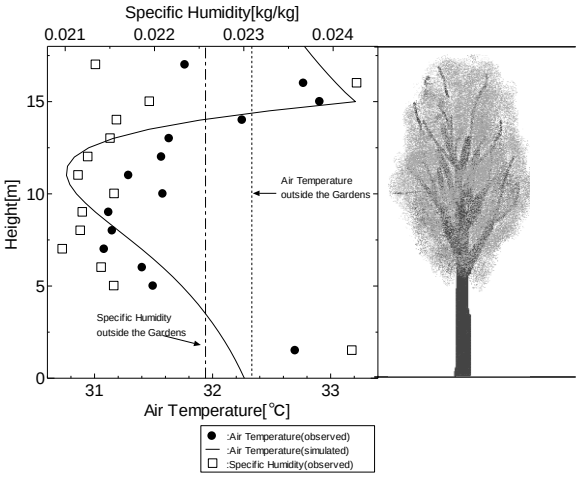
図－3　観測の模式図



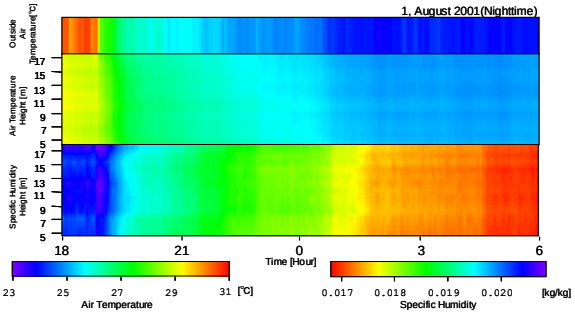
図―4　観測期間 4 日間の日射量と園外気温と林内気温と林内比湿の時系列



図―5　日中（6 時から 18 時）における日射量と園外気温と林内気温・比湿の時系列



図―6　2001 年 8 月 1 日 12 時の気温と比湿の鉛直プロファイル



図―7　夜間（18 時から 6 時）における園外気温と林内気温・比湿の時系列

表―2 は観測機材と観測項目の一覧である. 林床において，正味放射量，地中熱流量，気温・湿度の観測を行った．さらに小石川後楽園内における観測ポイント（**図―2 中**②）から直線距離で約 30m 離れた比高約 18m の台地の上に位置する中央大学理工学部校舎内において，全天日射量，気温・湿度を観測した.

2001 年の観測では，**図―2** 中の③において 17m のポールを設置し，地上高 5m から鉛直方向 2m 毎に 7 地点において気温・湿度の観測を行った．2005 年の観測では **図―2** 中○，●で示す点の高度 1.5mに気温・湿度計を設置し園内外の気温・湿度の水平分布を観測した.

(4)　鉛直方向の気温と湿度の測定方法

先述の通り 2001 年には 17m のポールに地上高 5m から鉛直方向 2m 毎に 7 地点において全天候型データロガー付温湿度計（ON-SET 社製 HOBO）を設置した（**図―3**）．2005 年にはセンサー部が高度 1.5m地点になるように同温湿度計を道路街灯，樹木に取り付けた．測器に雨水や直射日光が当らず，さらに通気が保てるようにカバーを取り付けた．サンプリング間隔は 1 分に設定し，瞬間値を記録する. 解析にはこの瞬間値を 20 分移動平均した値を使用した．さらに，測器の精度を向上させるために，観測前後においてアスマン式通風乾湿球計を用いて検定し，観測期間中に測器の交換を行い，器差を無くすことに努めた.

(5)　衛星データ

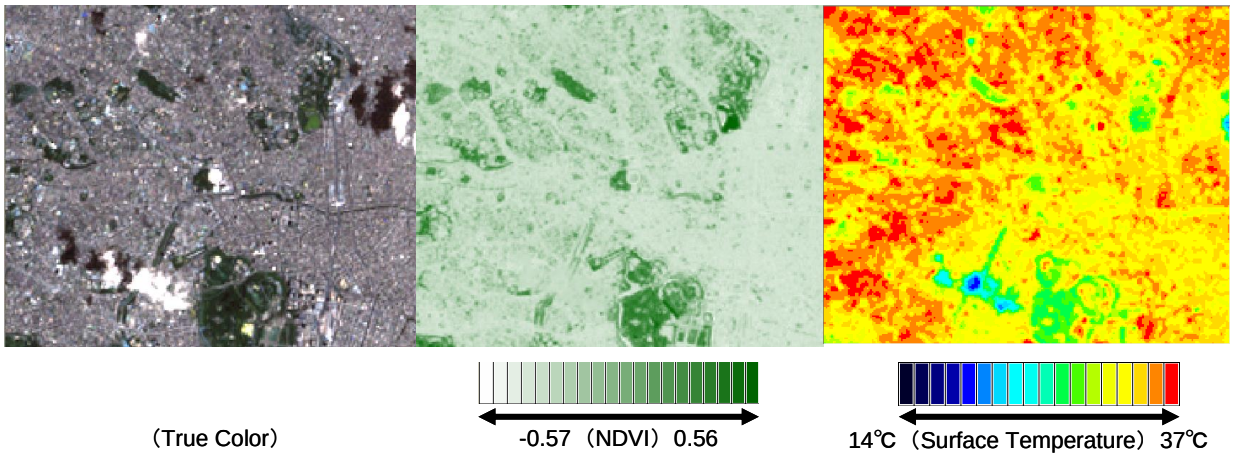
2002 年 8 月 10 日観測の Landsat7 / ETM+データを用いた．本研究ではこのデータを用いて NDVI(正規化植生指標)と表面温度を算出した. NDVI と表面温度 T は以下の式で与えられる [3].

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

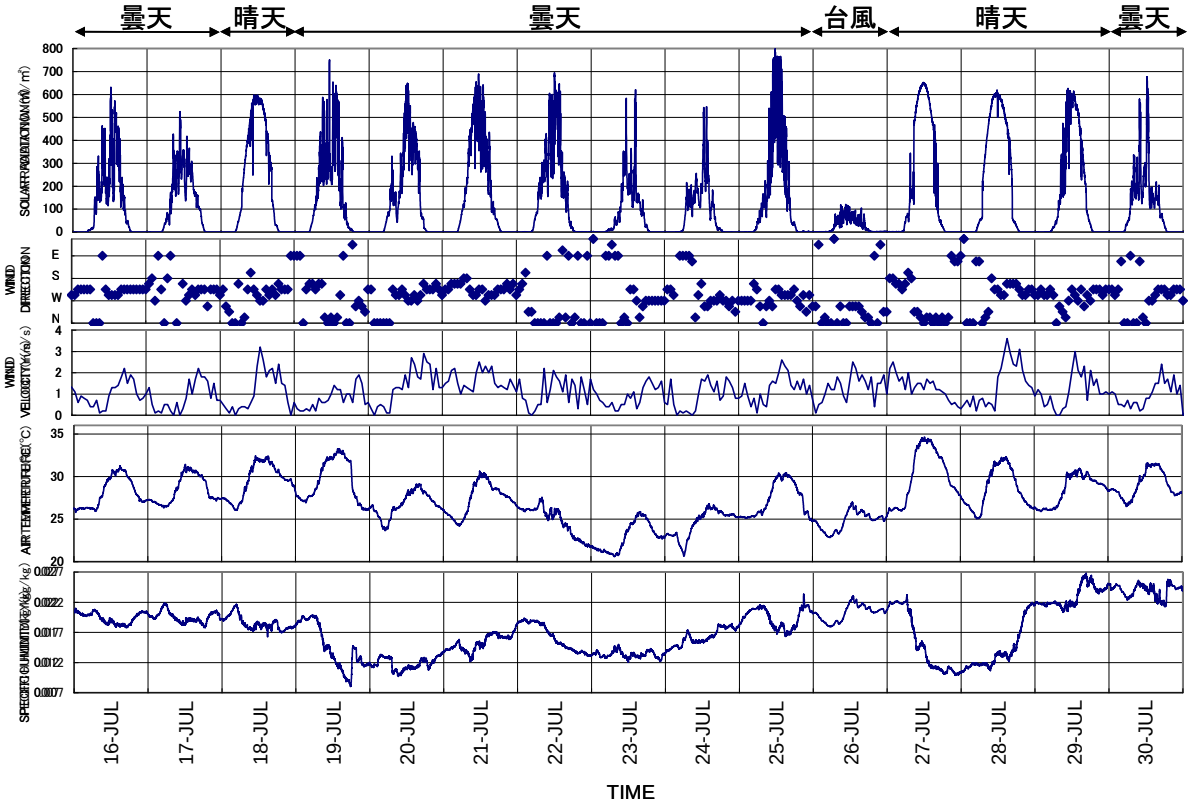
$$L = 0.037DN + 3.199 \quad (2)$$

$$T = \frac{1282.71}{\ln(\frac{666.09}{L} - 1)} \quad (3)$$

ここで NIR は Band4(近赤外域)，RED は Band3(可視域における赤色帯)，DN は Landsat Band6(熱赤外域)の画素値，L は放射輝度を示す.



図－8　観測地点周辺の衛星画像と NDVI と表面温度



図－9　日射量，風向・風速，気温，比湿の時系列（2005 年 7 月 17～30 日）

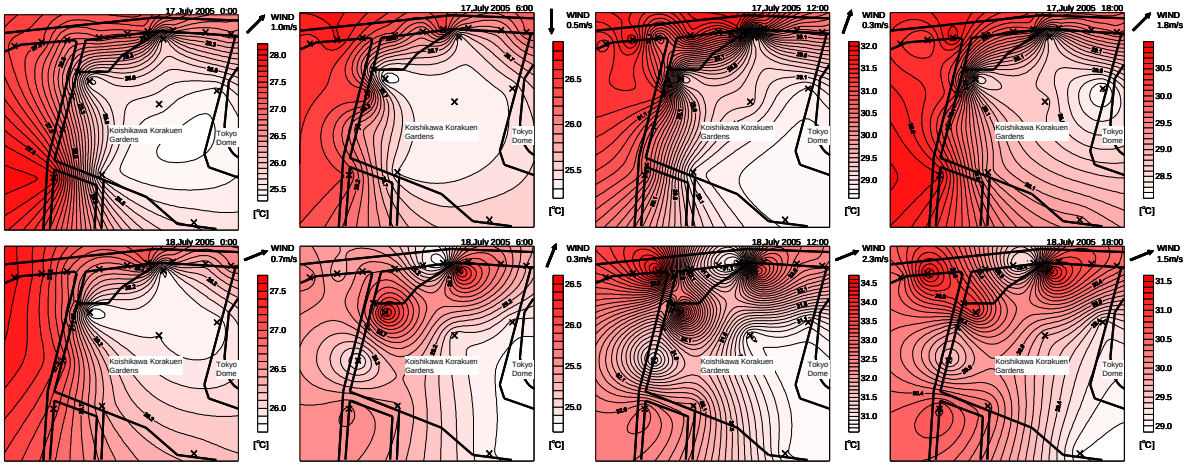
３．観測結果と考察

(1)　気温と湿度の鉛直構造

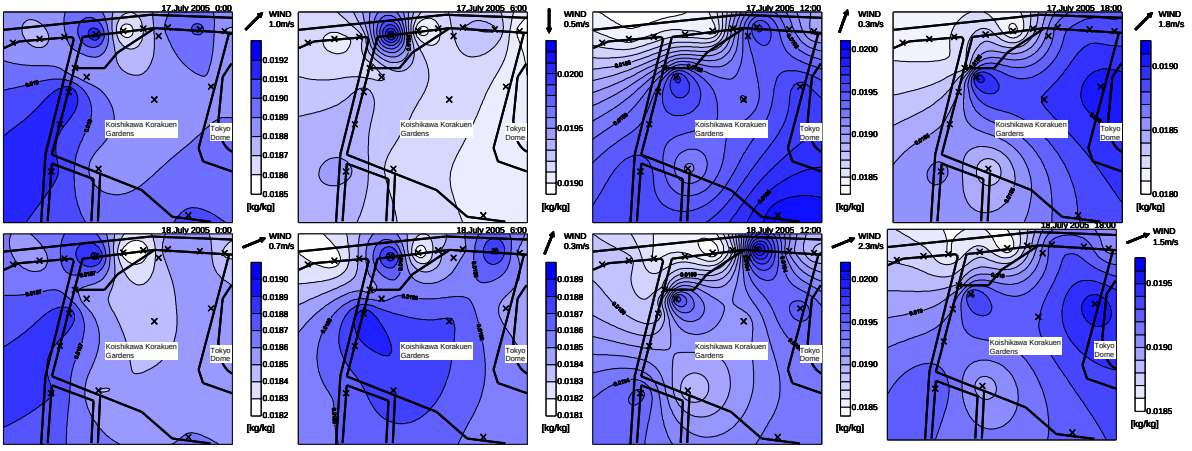
a)　気温・湿度－高度－時間の関係

晴天で風が強くない時には，境界層中の輸送は組織的な対流要素によって行われていることは良く知られている．地上の数高度に応答の速い温度計を設置すると，上下に相関の高い変動の様子が見られる．これは，上方に長く伸びたシステム，対流プルームを捉えている．これがどのような形をして，どのように風に乗って境界層を移動するかについては多くの観測結果があり [4),5)]，モデル化も行われている [6)]．文字 [7)]は森林上で観測された気温の変化を時－高断面で示している．その中で，スケールが100m程度の高温域が通り過ぎていく様子が現れている．また，高温域の一部は群落内部にも及んでいる．プルームの発達する正午前後において，プルームが林内の気温を上げていると示唆している．

図－4 は 2001 年 8 月 1 日から 4 日の 4 日間の日射量と園外気温と林内気温と林内比湿の時系列である．林内の気温と比湿については，濃淡図を利用し，多次元的に可視化することによって，時間－高度－気温・比湿の構造特性を容易につかむことを可能としている．群落内の気層では日中は樹冠部の温度と比湿の値が最も高い．これは顕熱や潜熱の交換が樹冠部において活発であることを表している．林内の気温，比湿ともに明瞭な日変化を示している．日射量が小さいときには，林内の気温と比湿



図－10　気温コンター(2005 年 7 月 17～18 日)



図－11　比湿コンター(2005 年 7 月 17～18 日)

は高度に依らずほぼ一定である．林内環境が日射に大きく依存していることがわかる．

b)　都市内緑地の気温と湿度

図－5 は日中（6 時から 18 時）における日射量と園外気温と林内気温・比湿の時系列である．群落内の大気層では日中は樹冠部の温度が最も高く，熱フラックスが樹冠部から下へと勾配に従い起こっていると考える．比湿についても，正午前後において，極めて高い値を示している．林内比湿には高さによる変化がある．すなわち，日の出後まもなく樹冠の表面は乾き，湿度は低下する．そして，時間と共に湿度の増加が順次林床に及んでいく．日中には地表面からの蒸発も相まって，林内全体の湿度が増加し、日射の減衰とともに，林内は乾燥していく．

図－6 は 2001 年 8 月 1 日 12 時の気温と比湿の鉛直プロファイルである．比湿に着目すると，樹冠部と地表面付近の比湿の値が高い．これは，地表面からの蒸発と樹冠での蒸散の影響に因るものである．比湿と気温は似た傾向を示している．著者ら[8]はこの気温・比湿の鉛直の鉛直分布に関して再現計算を行い，定性的によい分布を示した．

図－7 は夜間（18 時から 6 時）における園外気温と林内気温・比湿の時系列である．夜間においては，気温・比湿ともに減少していく．林内気温，比湿ともに鉛直方向はほぼ一定である．

(2)　気温と湿度の水平構造

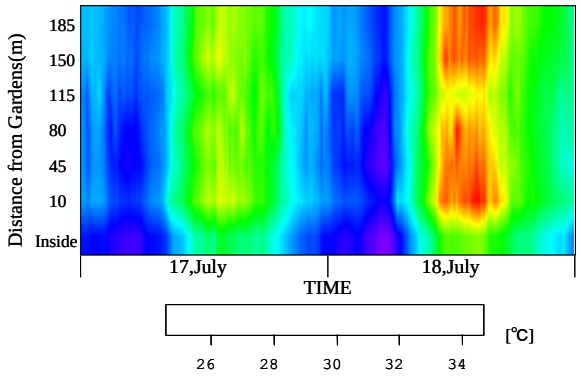
a)　NDVI と地表面温度

図－8 は 2002 年 8 月 10 日観測の Landsat / ETM+データを用いて算出した True Color と NDVI と表面温度である．中心に見える白いエリアは東京ドームでその東側に位置するのが小石川後楽園である．小石川後楽園内の NDVI は平均約 0.22 であった．　NDVI から小石川後楽園周辺には緑がなく園内からの冷気の滲み出し効果などを定量的に評価するにはよい観測地点であるといえる．

表面温度の図中左下の低温地帯は雲による影響である．小石川後楽園の表面温度は平均約 26℃であり，周辺の建物，道路より表面温度が約 5℃低く，小石川後楽園がクールスポットであることがいえる．

b)　気温と湿度の水平分布

図－9 は 2005 年 7 月 16 日から 7 月 30 日の**図－2** 中の観測地点①における日射量，風向・風速，気温，比湿の時系列である．この期間中は曇天日が多く，7 月 26 日から 7 月 28 日の晴天日は台風直後であり大気が不安定であった．晴天日と曇天日を比較するため本稿では 7 月 17，



図－12　園からの距離と気温の関係

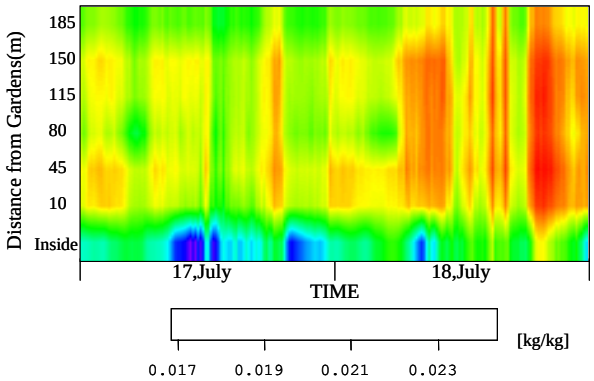


図-13　園からの距離と比湿の関係

18 日の解析データを用いる.

図－10 は 2005 年 7 月 17，18 日の気温のコンター図である. 右上の風の表示は**図－2** 中の観測地点①で計測した風向・風速である．夜間において小石川後楽園内は園外より気温は低く観測地点内で最大約 1.7℃の差がある．日中においてはその傾向は顕著になり観測地点内での気温差は最大で約５℃となった．17 日(曇天日)は園内外での気温分布は小石川後楽園と道路の境界で明瞭に分かれている．18 日(晴天日)の日中においては園内においても高温になる地点があり，曇天日のような園内外の分布とはならない．つまり晴天日の日中以外は園内外で明確な差が現れるということを示した.

図－11 は小石川後楽園における 7 月 17，18 日の比湿のコンター図である．観測エリア全体で日中，日射により蒸発散を促し，夜間よりも比湿は高い値を示すが気温のような顕著な水平分布は見られない．比湿の鉛直分布から樹冠部で蒸発散が活発であることを明らかにしたがその現象が林床の比湿を局所的に大きく変化させることはないことが示された．この比湿の局所的なバラつきは神田ら[9]が銀座オフィス街において潜熱 flux が 40%から 50%程度を占めている結果を示したように都市部ではエアコンなどの人間活動，街路樹などの様々な要因の発生源が局所的に混在しているためであると考える.

図－12，13 は**図－2** 中の●で示した観測地点の気温と比湿を小石川後楽園の原点として東から西へ並べた濃淡図の 7 月 17，18 日の時系列である．気温は小石川後楽園内で低く，道路では一様となっていた．西方向には冷気の滲み出し効果が小さいといえる．比湿に関しては**図－11** と同様，傾向は見られなかった.

４．まとめ

著者らは，都市内緑地の気候緩和効果の解明の一環として，1998 年から緑地内外において気象観測を行ってきた．本論文では都市内緑地の気温と湿度の鉛直・水平構造に着目し，　その観測結果について解析を行った.

森林内の気温と比湿の鉛直分布から群落内の気層では日中は樹冠部の気温と比湿の値が最も高いことが明瞭に確認できた．これは樹冠部と大気において顕熱や潜熱の交換が活発であることを表しており，林内の気温，比湿ともに明瞭な日変化を示している．日射量が小さいときには，林内の気温と比湿は高度に依らずほぼ一定である．林内環境が日射に大きく依存していることが濃淡図に図化することによって改めて明瞭に確認できた.

森林とその周辺の気温・湿度の水平分布から小石川後楽園内外の気温は晴天日の日中以外の時間帯では園内外で明瞭な気温差があることを示した．観測エリア内で夜間においては最低約 1.7℃園内の気温が低く，日中においては最大約 5℃の差があり，常に森林内の気温は低い．比湿の分布は局所的に変動が大きく全体的にまばらであった．比湿の鉛直分布より森林樹冠部で蒸散が活発していることを明らかにしたが樹冠部での比湿の増加が林床部の比湿に大きな変化を与えないことを示した.

謝辞：本研究の遂行にあたり，東京都東部公園緑地事務所と小石川後楽園公園事務所の多大な協力を得た．さらに衛星データに関して日本大学生産工学研究所の西川肇教授の多大な協力を得た．ここに合わせて謝意を表します.

参考文献

1)神田学，森脇亮，小林華奈:神宮の森の植物生理特性に基づいた都市緑地の大気保全ポテンシャルの評価, 水文･水資源学会誌, Vol. 11, No. 5, pp. 498-507, 1998.　2)高野武将・成田健一・三上岳彦・菅原広史・本條毅街路空間における放射量と温度の空間平均と変動－新宿御苑周辺市街地を例として．環境情報科学論文集 17: 47-52. 2003. 3)http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html 4)Kaimal, J.C. and Businger, J.A.: Case studies of a convective plum and a dust devil, Journal of Applied Meteorology, 9, pp. 612-620, 1970. 5)Wilczak, J.M. and Tillman, J.E.: The three dimensional structure of convection in the atmospheric surface layer, Journal of the Atmospheric Science, 37, pp. 2424-2443, 1980. 6)Telford, J.W.: The convection mechanism in clear air, Journal of the Atmospheric Science, 23, pp. 652-666, 1966. 7) 文字信貴：植物と微気象，大阪公立大学共同出版会, 140pp, 2003. 8)加藤拓磨・手計太一・山田正・日野幹雄：林内における熱収支・微気象の理論計算, 第 17 回数値流体力学シンポジウム, E1-4, 2003. 9)神田 学,高柳百合子,横山 仁,森脇亮：銀座オフィスビル街における熱収支特性,水文・水資源学会誌,10,329-336,1997.

(2005.9.30 受付)