
報 告

気象官署の周辺に存在する樹木列が気温の 観測値に及ぼす影響に関する風洞実験の報告

気象測器検定試験センター *

気象研究所環境・応用気象研究部 **

要 旨

気象官署の風上側に存在する樹木列が地上気温の観測値に及ぼす影響について、気象研究所の大型風洞装置を用いた模型実験を行った。樹木列の遮蔽効果によって風下側の気流が乱されるため、日射が地表面を暖めている場合、樹木列から近距離では暖気が持ち上げられて気温が上昇するが、樹木列から遠距離では気温が下降する。気温に影響が及ぶ距離は樹木列の高さで決まり、気温が変化する振幅は樹木列の遮蔽率で決まることが解った。

1. はじめに

地球温暖化問題への社会的関心が高まるなか、気象官署で行われる地上観測にも高い精度が求められるようになってきた。高精度な観測を行うには、観測地点からの距離が約 100m 以内の周辺部に良好な環境を確保する必要があり、世界気象機関では気温や風速など気象要素の各々について周辺環境と観測精度との関係を指針として取りまとめている (World Meteorological Organization, 2010)。

地球温暖化の監視では、都市化の影響が小さい地域に位置する気象官署を選定し、気温の観測を長期間にわたり継続して行う必要がある。しかしながら、観測環境が比較的良好な気象官署においても、周辺部に数多くの樹木が生育している場合があり、樹木の成長に伴って気温の観測値が中長期的に変化する可能性が指摘されている (近藤, 2010; 近藤, 2012)。

樹木とくに樹木の列が風下側の地上気温に及ぼす影響については、防風林の遮蔽効果という観点から研究が蓄積されている (Oke, 1978; Cleugh, 1998; Brandle et al., 2009)。遮蔽効果によって気流が乱されるため、日射が地表面を暖めている場合、樹木列から近距離では暖気が持ち上げられて平均気温が上昇するが、遠距離では平均気温が下降することが知られている。しかし樹木列のパラメータと地上気温に及ぼす影響との関係については、系統的な研究は見当たらない。

本稿は、樹木列の遮蔽効果が地上気温の観測に及ぼす影響について、気象研究所の大型風洞装置を用いて行った模型実験の報告である。平坦で一般的な草地を空気力学的に縮尺 1/130 で風洞内に再現し、樹木列を想定して風洞幅のネットを張った。さらに日射で地表面が暖められた状態を想定して風洞の床面を加熱した。地上 1.5m に相当する高度における平均気温の分布を、ネットの高さや遮

* 細道 晶子・河野 沙恵子・梅原 賢之

** 小野木 茂・萩野谷 成徳・毛利 英明

(平成 28 年 11 月 30 日発行)

蔽率を変えて測定し、これらのパラメータと平均気温に及ぶ影響との関係について検討を行った。

2. 風洞実験

模型実験は気象研究所の大型風洞装置を用いて行った。平坦で一様な草地を想定し、風洞の床面に粗度としてブロックと針金を設置した（第1図）。ブロック群の風下側では、風洞への流入風速 U_{inflow} が 2m/s である場合、境界層における平均風速の対数則 $U \propto \ln(z/z_0)$ が高度 $z_{\text{tunnel}} = 300\text{mm}$ まで確認できた。空気力学的粗度長 $z_{0,\text{tunnel}}$ は 0.07mm から 0.08mm の間にあると評価でき、草地における典型的な空気力学的粗度長として 10mm を採用すると（Stull, 1988）、草地上の接地境界層が縮尺 $1/130$ で高度 $z = 40\text{m}$ まで再現できたと考えることができる。

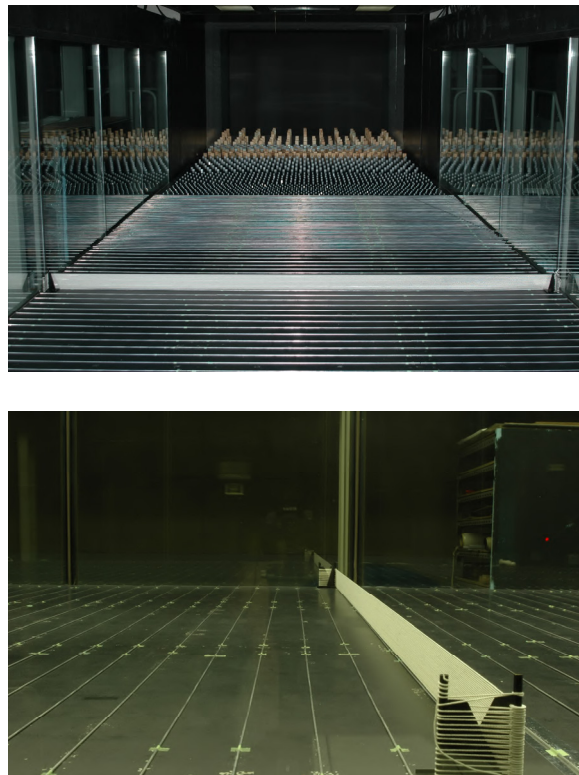
樹木列を想定し、ブロック群の風下側に設定した長さ方向の座標に関する原点 $x = 0$ に、風洞幅のネットを張った（第1図）。ネットの高さ h は 3m 、 6m あるいは 12m 相当とし、幾何学的遮蔽

率つまりネット面上で紐が占める割合を $1/3$ あるいは $2/3$ とした。

日射で地表面が暖められた状態を想定し、風洞の床面を加熱した。風洞への流入風の温度との差 $T - T_{\text{inflow}}$ を 10°C あるいは 30°C に保ち、地上 1.5m に相当する高度における気温の分布を、ネットがある場合と無い場合について測定した。乱流によって気温は時間的に変動するから、平均値 T を得るには各点で 1000s 以上の測定が必要であった。ところが測定中は流入風温度や床面温度が必ずしも一定でなかったから（後述）、平均気温 T と平均床面温度 T_0 との差 $T - T_0$ を解析の対象とする。同様に地上 1.5m に相当する高度における水平方向の平均風速 U の分布も一部の設定について測定した。以上の測定は全て風洞の中心軸に沿った鉛直面において行った。

2.1 流れ場設定の詳細

気象研究所の大型風洞装置は測定部が幅 3m × 高さ 2m × 長さ 18m で、風上側に幅 3m × 高さ



第1図 樹木列を想定したネットの風下側（上段）および側面（下段）からの撮影写真。

2m × 長さ 4m の区間が接続している (気象研究所, 1980). 区間の風上端から長さ 7.0m の範囲に高さ 10mm から 150mm のブロック数種類を並べ, 境界層を生成する粗度とした. その風下側には直径 3mm で風洞幅の針金を 50mm 間隔で長さ 2.4m の範囲に並べ, さらに 100mm 間隔で長さ 11.5m の範囲に並べて, 草地に相当する粗度とした (第 1 図). ネットを張る位置つまり長さ方向の座標に関する原点 $x = 0\text{m}$ はブロック群の風上端から 10.1m の位置に設定し, 風下側を正の方向とした.

風洞への流入風速を 2m/s に設定し, 草地と想定する範囲の風上端・中央部・風下端 ($x_{\text{tunnel}} = -0.125\text{m}, 4.375\text{m}, 8.875\text{m}$) において, 平均風速 U および風速変動の長さ方向成分 u と高さ方向成分 w をレーザドップラー流速計で測定した (第 2 図). 平均風速 U と運動量輸送率 ($-uw$) の鉛直分布は各々が良く一致し, 境界層が長さ方向に一様であることが解る. 草地の中央部における高度 $z_{\text{tunnel}} = 10\text{mm}$ から 270mm までの結果を対数則 $U = (u_* / \kappa) \ln(z/z_0)$ で適合すると空気力学的粗度長 $z_{0,\text{tunnel}}$ は 0.077mm となり, 草地における空気力学的粗度長 10mm と比較して縮尺は 1/130 となる. またカルマン定数 $\kappa = 0.4$ に対する摩擦速度 u_* は ($-uw$) の測定結果を良く再現する (第 2 図の点線).

なお風洞への流入風速が 3m/s および 4m/s である場合についても平均風速 U と運動量輸送率 ($-uw$) の鉛直分布を測定し, 流入風速を用いて規格化すると風速 2m/s で流入する場合の鉛直分布と良く一致することを確認した. 流入風速 2m/s におけるレイノルズ数が草地上の接地境界層を再現するのに十分な大きさであることが解る (Stull, 1988).

2.2 樹木列用ネットの詳細

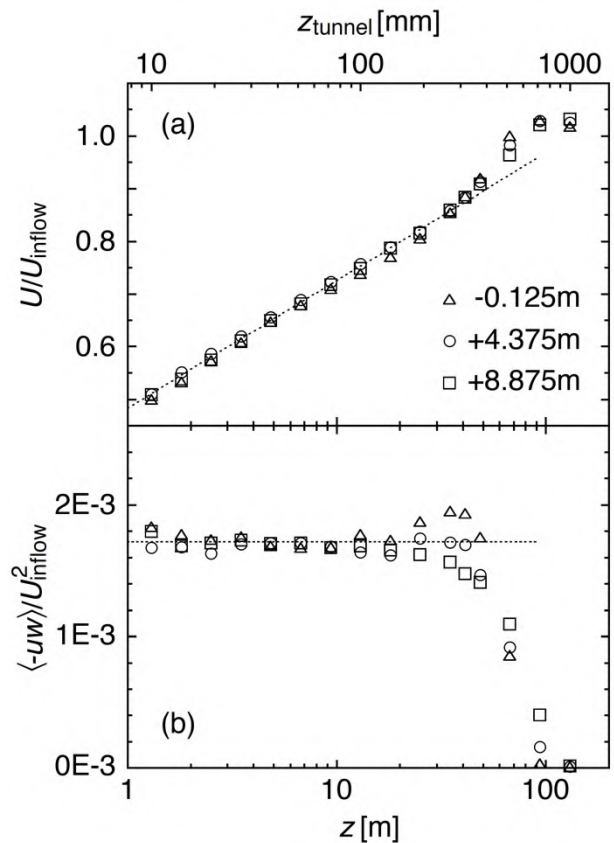
樹木列のモデルであるネットは直径 1.4mm の紐を水平に張って製作した (第 1 図). 隣接する紐の間隔は幾何学的遮蔽率 1/3 については 2.95mm, 遮蔽率 2/3 については 0.75mm である. 紐は全て同一面上に張った.

風洞幅に張られたネットの空気力学的特性は幾何学的遮蔽率と高さ h で決まる. 遮蔽率が 1/3 の場合, 地上 1.5m に相当する高度で風下側 $x=3h$

と $6h$ の距離において, ネットがある場合に平均風速がネットが無い場合から変化する量 δU をネットが無い場合の平均風速 U で規格化した変化率 $\delta U/U$ は, $h = 3\text{m}$ 相当で -50% と -43% , $h = 6\text{m}$ 相当で -50% と -53% , $h = 12\text{m}$ 相当で -53% と -60% である. 遮蔽率が 2/3 の場合, $h = 3\text{m}$ 相当で -100% と -81% , $h = 6\text{m}$ 相当で -119% と -104% , $h = 12\text{m}$ 相当で -112% と -115% である. 風速変化率が -100% 以下の場合には風上側への逆流が平均流として生じている.

2.3 温度設定の詳細

気象研究所の大型風洞装置はボイラや冷凍機を



第 2 図 縦軸は流入風速 U_{inflow} を用いて (a) 平均風速 U あるいは (b) 運動量輸送率 ($-uw$) を規格化した値. 横軸は床面からの高度に関する風洞における実寸値 z_{tunnel} (上軸) と現地における縮尺 1/130 での換算値 z (下軸). ネットの位置 $x = 0$ から風上側 0.125m (三角) および風下側 4.375m (丸) と 8.875m (四角) での測定. 点線は風下側 4.375m における測定値の対数則による最小二乗法適合.

備えており、加熱・冷却した不凍液を測定部の床面パネル内に循環させることで、床面温度 T_0 を 0°C から 50°C の間で設定する機能を有している(気象研究所, 1980). 床面を加熱して流入風温度との差 $T_0 - T_{\text{inflow}}$ を 10°C あるいは 30°C に保った状態で測定を行った.

大型風洞装置は室内回流型であるため、床面を加熱すると結果的に流入風温度も上昇する. 必要に応じて屋外との換気を行い、さらに床面温度の設定値を微調整して、流入風温度との差を設定値 $T_0 - T_{\text{inflow}}$ の 0.1°C 以内に抑え、流入風と風洞の筐体との温度差も 0.1°C 以内に抑えた.

床面の加熱によって形成される温度成層が、草地と想定する範囲で長さ方向に概ね一様であることは、冷線温度計とレーザドップラー流速計を用いて測定した熱輸送率の鉛直分布を比較することで確認した. また床面を加熱してもネットの温度には殆ど影響しないことを赤外線画像で確認した.

2.4 気温・風速測定の詳細

風洞の床面を加熱した状態で、地上 1.5m に相当する高さにおける平均気温 T の分布を、ネットの風下側で冷線温度計を用いて測定した. 比較のためネットが無い状態での測定も行ったが、測定点の数は相対的に少なく、解析では必要に応じて内挿を行うこととする. 測定中は床面温度や流入風温度を監視し、平均気温 T と平均床面温度 T_0 との差 $T - T_0$ を算出した.

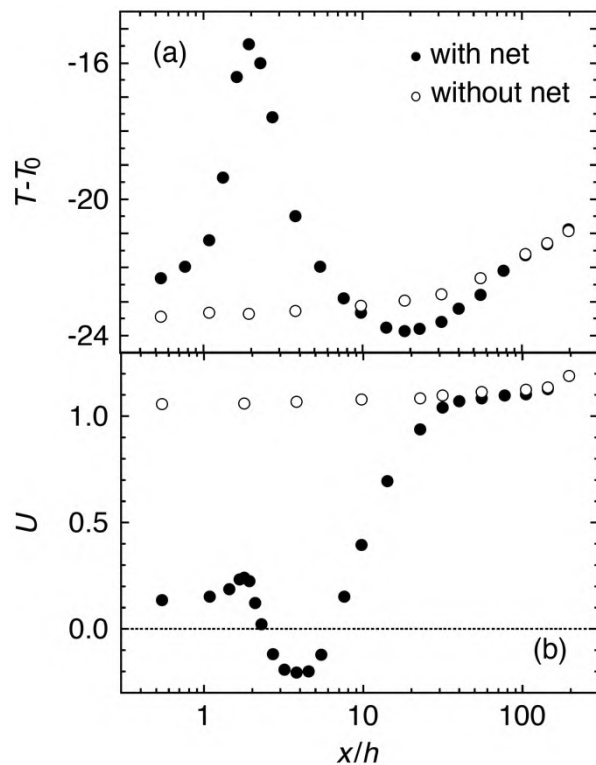
なおネットが遮蔽率 $2/3$ で高さ $h = 6\text{m}$ 相当の場合については追加測定を行った. 水平方向の平均風速 U をレーザドップラー流速計を用いて地上 1.5m に相当する高度で測定した. また風洞幅 3m に張ったネットだけでなく幅 0.46m つまり 60m 相当幅に張ったネットについても平均気温 T を測定した. さらに $x_{\text{tunnel}} = 0\text{m}$ に張ったネットの風下側だけでなく $x_{\text{tunnel}} = 7.9\text{m}$ に張ったネットの風上側でも平均気温 T を測定した.

3. 実験結果と議論

第3図に 1.5m 相当の高さにおける温度差の平均 $T - T_0$ と水平方向の平均風速 U の測定例を示す.

ネットがある場合、平均気温は近距離では高く遠距離では低くなり、平均風速は低くなる. 温度差 $T - T_0$ や平均風速 U はネットが無い場合も緩やかに変化するため、ネットの有無による変化量 $\delta(T - T_0)$ や δU を同じ距離 x におけるネットが無い場合の値 $|T - T_0|$ や U で規格化した気温変化率や風速変化率を調べることにする.

気温変化率 $\delta(T - T_0)/|T - T_0|$ の結果を第4図に示す. 変化率の最大値が $0.1 - 0.3$ の範囲にあるのに対し、気象官署の観測で樹木の成長が原因とされる年平均気温の上昇は最大で 0.3°C 程度である(近藤, 2010; 近藤, 2012). 地表面と高度 1.5m との温度差は気象研究所の露場において夏期の日中で 5°C 程度であるので、気温変化率は 0.1 程度となり実験結果と矛盾しない. 実験は樹木列の遮蔽効果を良く再現していると考えられる.



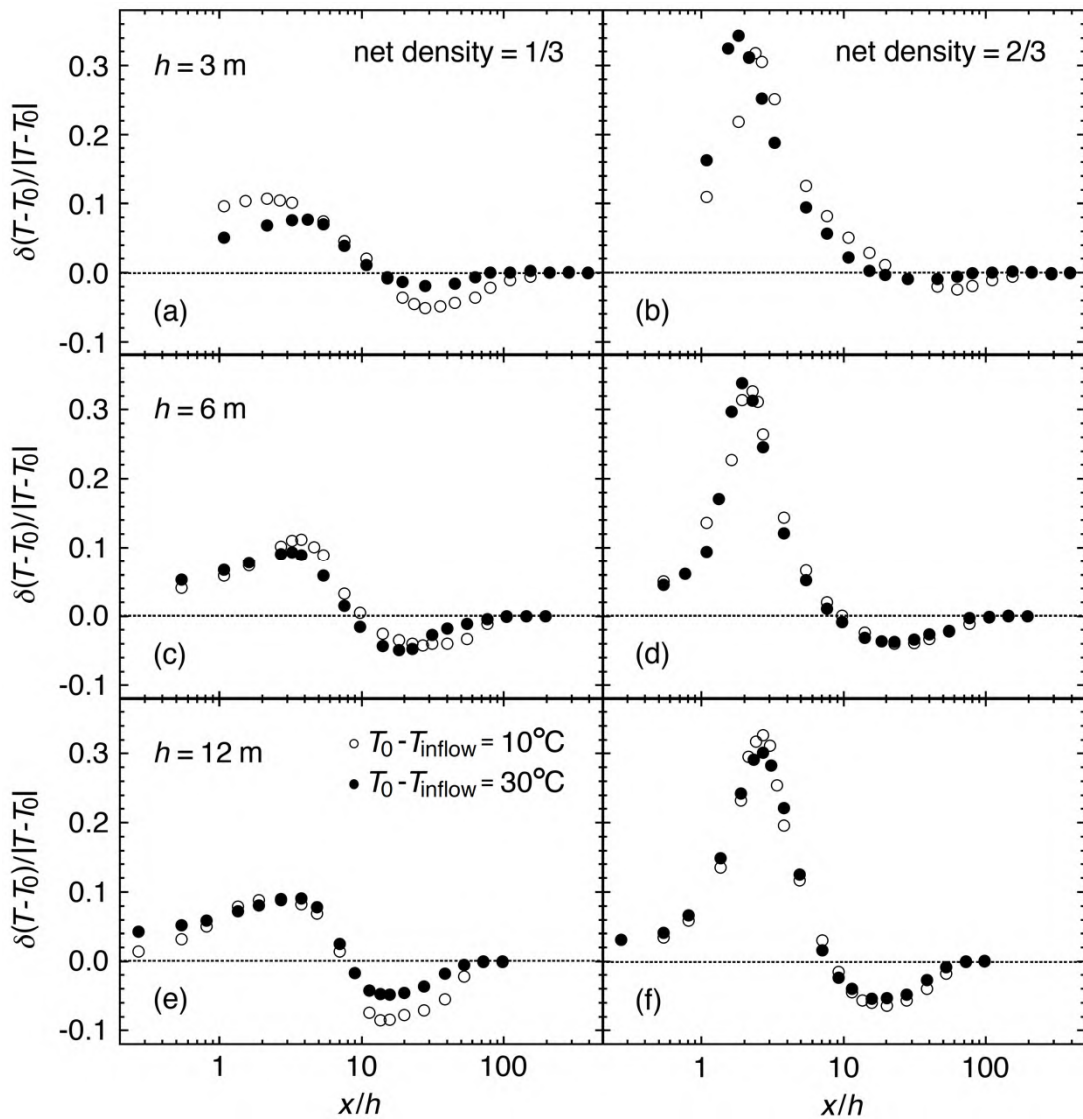
第3図 縦軸は 1.5m 相当の高度における (a) 平均気温 T と平均床面温度 T_0 との差あるいは (b) 平均風速 U . 横軸はネットからの距離 x をネットの高さ $h = 6\text{m}$ 相当で規格化した値. 流入風と床面との温度差は 30°C . 黒丸は遮蔽率 $2/3$ のネットがある場合. 白丸はネットが無い場合.

第4図から、平均気温の上昇域と下降域のネットからの距離 x は、ネットの高さ h だけで決まることが解る。つまり距離が約 $10h$ までは平均気温が上昇し (Cleugh, 1998; Brandle et al., 2009), 約 $10h$ から約 $70h$ までは平均気温が下降する。また気温変化率の振幅は、ネットの幾何学的遮蔽率だけで決まる。床面温度と流入風温度との差 $T_0 - T_{inflow}$ つまり気流の安定度は、少なくとも本実験の設定範囲では気温変化率に影響していない。

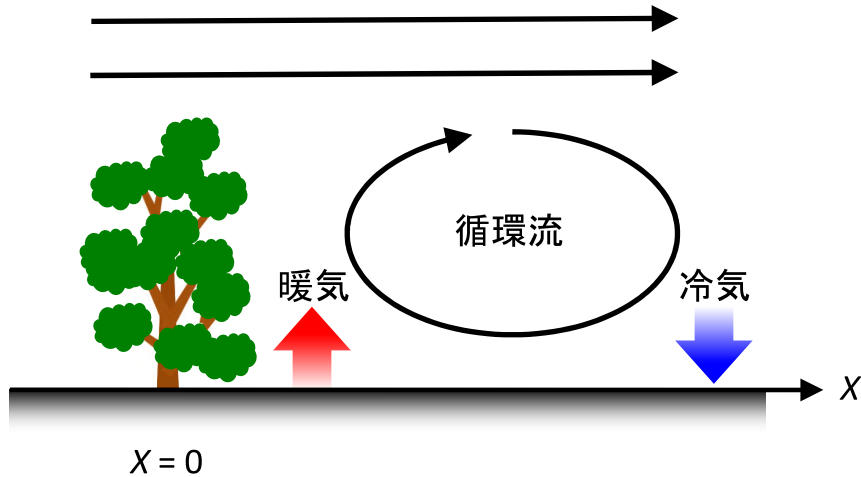
以上の結果を説明するには、ネットの風下側に

おける平均的な流れ場に、第5図のような循環流の成分が存在すると考えれば良い (Oke, 1978)。循環流はネットから近距離では床面近傍の暖気を持ち上げて平均気温の上昇をもたらすが、遠距離では逆に冷気を引き下ろして平均気温の下降をもたらす。実験結果から、平均気温が変化する距離 x の範囲を決める循環流の大きさはネットの高さ h で決まり、平均気温が変化する振幅を決める循環流の強さはネットの遮蔽率で決まることが解る。

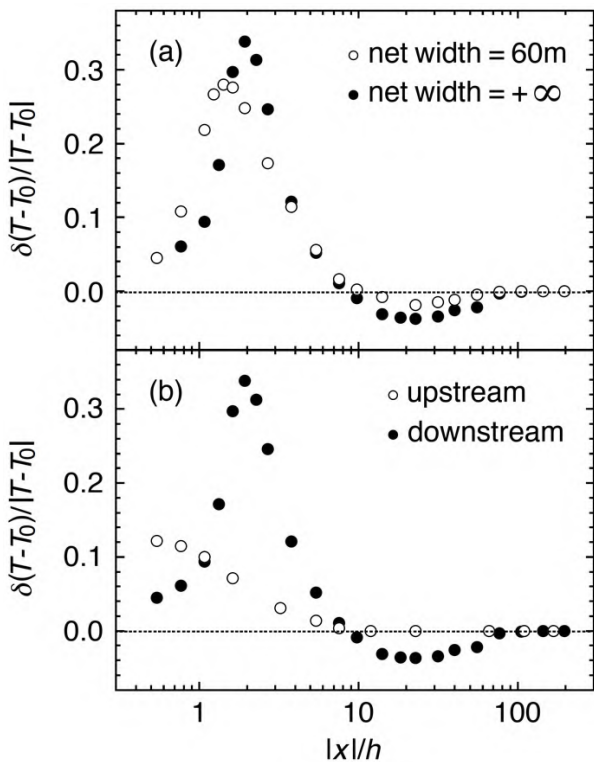
第6図 a に、幅が60m相当であるネットと風



第4図 縦軸は気温変化率 $\delta(T - T_0)/|T - T_0|$ 。横軸はネットからの距離 x をネットの高さ $h = 3\text{m}$ 相当(上段), 6m 相当(中段), 12m 相当(下段)で規格化した値。右側はネットの遮蔽率が $1/3$ 。左側はネットの遮蔽率が $2/3$ 。白丸は流入風と床面との温度差が 10°C である場合。黒丸は温度差が 30°C である場合。



第5図 座標 $x=0$ に位置する樹木列の風下側に形成される循環流. 地表面付近で生じた暖气の循環流による上方への輸送を赤矢印で, 冷气の循環流による下方への輸送を青矢印で示す.

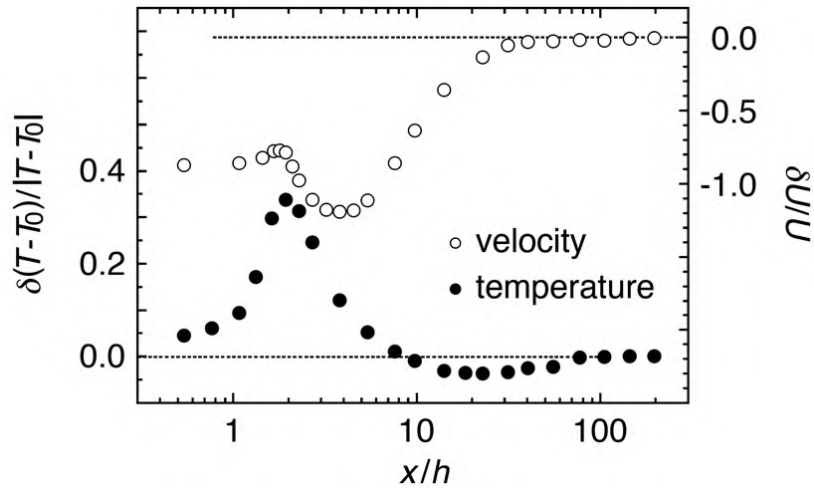


第6図 縦軸は気温変化率 $\delta(T-T_0)/|T-T_0|$. 横軸はネットからの距離 x をネットの高さ $h=6\text{m}$ 相当で規格化した値. 流入風と床面との温度差が 30°C でネットの遮蔽率が $2/3$ である場合について (a) 幅が 60m 相当であるネットの風下側における気温変化と (b) 風洞幅に張ったネットの風上側における気温変化を白丸で示す. 黒丸は第4図dと同じ.

洞幅に張ったネットの気温変化率を, ネットの高さ h が 6m 相当, 遮蔽率が $2/3$ で温度差 T_0-T_{inflow} が 30°C の場合について比較する. 両者の気温変化率に顕著な差は無い. 樹木列の幅が高さ h の10倍以上あれば, 列の中央部の風下側における平均風速については幅の有限性を無視できることが知られており (Brandle et al., 2009), 平均気温についても同様であると考えられる.

第6図bに, 風洞幅に張ったネットの風上側と風下側における気温変化率を, ネットの高さ h が 6m 相当, 遮蔽率が $2/3$ で温度差 T_0-T_{inflow} が 30°C の場合について比較する. 風上側の気温変化は, 風下側の変化に比べて, 変化が起きる距離 x の範囲が小さく変化の振幅も小さい. 同様の傾向が平均風速についても知られており (Oke, 1978; Cleugh, 1998; Brandle et al., 2009), 地上気象観測の環境を考える際は, 樹木列の風下側に注目すれば充分であることが解る.

最後に第7図を用いて, 地上 1.5m に相当する高さにおける気温変化率と風速変化率を, ネットの高さ h が 6m 相当, 遮蔽率が $2/3$ で温度差 T_0-T_{inflow} が 30°C の場合について比較する. 平均気



第 7 図 縦軸は左側が気温変化率 $\delta(T-T_0)/|T-T_0|$ で黒丸に対応，右側が風速変化率 $\delta U/U$ で白丸に対応．横軸はネットからの距離 x をネットの高さ $h = 6\text{m}$ 相当で規格化した値．流入風と床面との温度差が 30°C でネットの遮蔽率が $2/3$ である場合における測定．黒丸は第 4 図 d と同じ．

温が変化する距離 x の範囲と平均風速が変化する距離 x の範囲は良く一致しており，両者の変化が第 5 図のような循環流によって引き起こされるといふ説明と矛盾しない．しかし平均気温がネットから近距離では高く遠距離では低くなるのに対し，平均風速は低くなるだけである．よって露場において水平方向の平均風速だけを測定しても樹木列の遮蔽効果に対する平均気温の補正はできない．補正には少なくとも高さ方向の平均風速や変動風速の測定が必要である．

4. まとめ

風洞における模型実験で樹木列の遮蔽効果を再現した．気温に影響が及ぶ距離の範囲を評価するには樹木列の高さを考慮すれば充分であり，気温が変化する振幅を評価するには樹木列の遮蔽率を考慮すれば充分であることが解った．

樹木列の遮蔽効果による地上気温の上昇と下降を避けるには，樹木列の高さ h の数十倍以上は

離れた場所で観測を行う必要がある．この距離は世界気象機関の指針における理想的な風の観測環境に概ね対応するが (World Meteorological Organization, 2010)，気温の変化が気流の乱れによって生じることを考慮すれば妥当な結果である．地上気温の上昇だけを避けるには，樹木列の高さ h の 10 倍以上離れた場所で観測を行えば充分である．この距離は指針における理想的な地上気温の観測環境に概ね対応する．世界気象機関の指針に基づいて気象官署の周辺環境を良好に保てば，樹木列の遮蔽効果に対しても良好な周辺環境を確保できると考えられる．

謝辞

本調査は気象庁観測部の技術開発課題「低木植栽等周辺環境と露場内微気象に関する調査」(平成 26-27 年度)の一環として行ったものである．風洞実験を支援いただいた (有) 気象環境計測の堀晃浩氏と八木俊政氏に感謝いたします．

参 考 文 献

- Brandle, J.R., L. Hodges, J. Tyndall and R.A. Sudmeyer (2009): Windbreak Practices. North American Agroforestry: an Integrated Science and Practices (2nd ed.), edited by H.E. Garrett, American Society of Agronomy, Madison, U.S.A., 75–104.
- Cleugh, H.A. (1998): Effects of Windbreaks on Airflow, Microclimates and Crop Yields. Agroforestry Systems, **41**, 55–84.
- 気象研究所 (1980): 気象研究所の新しい諸設備の紹介. 天気, **27**, 565–577.
- 近藤純正 (2010): 日本における温暖化と気温の正確な観測. 伝熱, **49**, 58–67.
- 近藤純正 (2012): 日本の都市における熱汚染量の経年変化. 気象研究ノート, **224**, 25–56.
- Oke, T.R. (1978): Boundary Layer Climates, Methuen and Co, London, U.K., 211–218.
- Stull, R.B. (1988): An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Kluwer, Dordrecht, Netherlands, 353–354 and 378–381.
- World Meteorological Organization (2010): WMO Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (2008 edition updated in 2010), part 1, 19–29.