

緑地の日だまり効果を抽出する簡易測定装置の開発と適用

Practical measurement method for the effect of wind speed reduction by trees in green space on temperature field

北原 俊史*1 高木 直樹*2 浅輪 貴史*1 円井 基史*3
Toshifumi Kitahara Naoki Takagi Takashi Asawa Motofumi Marui

*1 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology

*2 信州大学 Shinshu University

*3 金沢工業大学 Kanazawa Institute of Technology

Corresponding author: Toshifumi Kitahara, kitahara.t.af@m.titech.ac.jp

ABSTRACT

Green spaces are considered to be an effective way of mitigating the urban heat island effect. The reduction in wind speed behind trees and buildings modifies the environmental conditions or microclimate. This phenomenon is known as the Hidamari effect. In this study, we developed the practical measurement method, and we applied it for understanding the effect of wind speed reduction by trees in green space on the temperature field.

キーワード: ヒートアイランド, 日だまり効果, 緑地, 簡易測定法

Key Words : Urban heat island, Hidamari effect, Green space, Simple measuring method

1. はじめに

1-1. 背景

近年, 都心部においてはヒートアイランド現象が問題となり, その対策として植樹や壁面緑化といった緑化策が推進されている¹⁾. 樹木の日射遮蔽や蒸散作用といった熱環境改善の効果が明らかになっている一方, 植樹において樹木の配置や樹高, 密度によっては風速の減少などにより熱環境の悪化を促進させる懸念も指摘されている²⁾. 気象観測点を例にすると, 樹木の成長や周辺の建物によって観測点周辺の風が弱まり, 地表面温度と気温に影響を与える日だまり効果が起きていることが明らかとなっている^{3,4,5,6)}.

日だまり効果は近藤らによって, 周辺の風が弱められることで日平均気温, 特に地温が上昇する現象³⁾と定義されている. この日だまり効果は都市内でも発生し, 特に周辺が樹木や建物に囲まれた空間では熱環境において重要な課題となることが予想される. よって日だまり効果の確認は気象観測点周辺(都市中心部, 郊外, 山間地内)の樹木の管理のみならず, 周囲条件の異なる地域のランドスケープ計画において, 熱環境改善に有効な植樹計画のための指針へとつながると考えられる. しかし, 地表面は場所によって被覆状態が異なるため, 様々な要因が複雑に混在する屋外において風速の減少(変化)によって日だまり効果が発現す

るか否かを確認するためには, あらゆる地点でより簡易的な測定手法が望まれる.

1-2. 本研究の既往研究との位置づけ・目的

緑地の存在は夏季の熱環境において涼しい空間の形成要因として考えられてきた. 緑地の熱環境改善効果としては, 夏季夜間に生成される冷気のにじみ出し, 冷気流の影響が確認されている^{7,8)}. しかし, 日中では日射もあり風が不安定なために冷気の生成は難しく, 熱環境が最も悪化する日中において効果は期待できない⁹⁾. 日中における樹木の熱環境改善効果は蒸散作用とともに, 樹冠部による日射遮蔽効果が大きい. 樹木に覆われた空間では, 樹木の日射遮蔽効果によって低温な熱放射場が形成され, 緑地内が熱的快適性の高い空間を形成していることが示されている^{10,11)}. しかし, 日射遮蔽効果の影響がない空間では, 日中の緑地による気温低減効果は確認されていない.

防風林の減風による昇温効果に関する研究は, 農業気象学の分野で古くから行われている¹²⁾. しかし, 都市環境の観点から人々の生活空間内における影響は考察されていない. さらに, 屋外の地表面は日射量や地表面被覆, 含水率, 粗度等が場所によって異なるため, 風速の変化だけでは地表面温度や気温は決定しない. この点に関して, 地表面状態が比較的均質である灌水期の水田に注目し, 屋敷林周辺

の水田の水温分布を航空機熱画像より観測した研究がある¹³⁾。その結果より、屋敷林の風下側に明確な水温上昇が確認されている。しかしながら、水田という限定された土地被覆であり、一般的な土地被覆や都市空間などにおいて、正しく風速の変化のみを捉えた日だまり効果の確認は難しい状況である。

以上を踏まえると、日だまり効果を正しく抽出することは、熱環境改善計画の一つの指針として重要な知見となると考えられる。しかし、上記の通り地表面の状態が多様な屋外では日だまり効果を抽出するには至っておらず、風環境や地表面状態の異なる別のフィールドであっても簡易に日だまり効果の強度を求めることが可能となれば、都市のどのような場所で日だまり効果が発生しやすいかといった現象の理解や熱環境対策を進めるにあたり重要な情報になると考える。また、日だまり効果の正しい抽出には、温度を決定する条件の多い気温よりも日射・風速の条件に限定して測定できる地表面温度に着目することが望ましいと考える。

そこで本研究では、樹木による風速の変化に伴う日だまり効果による地表面温度へ影響を実験的に確認する簡易測定装置を開発するとともに、実際の広場に測定装置を適用し、緑地の日だまり効果を推定することを目的とする。

1-3. 本研究のプロセス

図1に日だまり効果のメカニズムを示す。屋外の地表面温度に影響する要素としては日射 S^{\downarrow} と大気放射(下向き長波放射) L^{\downarrow} から反射を減じた入力放射量 R^{\downarrow} が、顕熱輸送量 H 、潜熱輸送量 iE 、大気放射(上向き長波放射) σT_s^4 、地中伝導熱 G に変換される。その中で顕熱輸送量 H と潜熱輸送量 iE は周囲の風速(対流)の強さによって輸送量が変化し、その収支から地中伝導熱 G に差が生じる。日だまり効果は、周囲樹木による防風効果により樹木近傍の対流が減少することで地中伝導熱 G が大きくなり、地表面温度を上昇させ、周囲気温に影響を及ぼす効果である。よって、地表面温度を調べることで日だまり効果を抽出可能である。

屋外の熱収支実測において地表面温度上昇の分析には弱風条件と強風条件の各測定点において地表面の被覆材料と状態に応じた水分量や傾度を確認し、同等な容積のなかで熱収支測定を行う必要がある。また、地表面の成分や含水率、傾度や粗度を確認したうえで長短波放射収支や顕熱・潜熱フラックス、地中伝導熱といった熱収支を多くの機器を用いて測定し分析する必要となる。しかし各観測点における周囲の熱収支要素である日射、風速、水蒸気量はそれぞれの状態が異なり、風速の減少による温度影響のみを抽出することは難しい。そこで、本論の目的である日だまり効果の強度をあらゆる地点で測定するため、1)日射量と風速の変化によって状態が変化し、熱容量が他より大きく、温度変動が小さい媒体(水)を用意して実験を行う。実験結果より試験媒体の水温変化の特性を確認した上、2)防風林による広場内の風速変化が確認できる場所で実際の水温の

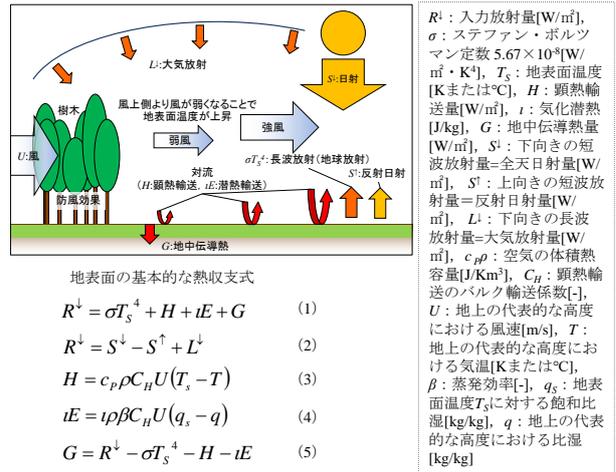


図1 表面熱収支式と日だまり効果のメカニズム

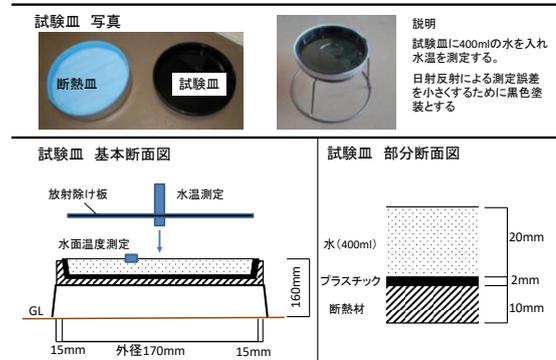


図2 試験装置の仕様

表1 各物質のパラメータ¹⁴⁾

地面の状態	熱容量 $c_g \rho_g$ (J/m ³ K) × 10 ⁶	熱伝導率 λ_g (W/mK)
乾燥砂地・粘土	1.3	0.3
湿り砂地・粘土	3.0	2
アスファルト	1.4	0.7
水	4.18	0.57
空気	0.0012	0.025



図3 弱風点・強風点の実施状況

変化を確認し、日だまり効果の抽出を試みる。

2. 簡易測定装置の開発

2-1. 測定原理

本測定装置では直径 160 mm(外径 170mm)、深さ 30 mmの試験皿に 400ml の水を入れた試験皿を使用する。試験皿の内

面は周囲からの放射の影響による測定誤差を小さくするために黒色塗装とし、水深は20mmとして地表面勾配の水平補正10mmを考慮する。試験装置の水面高さは地面からの熱伝導の影響がないよう100mm以上空間を設ける。本測定では装置の製作上160mmとしている。

測定機の精度について、距離対測定範囲は測定距離：測定範囲=1:1であり、対象物と測定器の距離=測定範囲となる。そのため試験皿の直径は実際の測定距離かつ周囲からの放射の影響がない範囲で選定し、今回は160mmとした。

試験皿を風速が異なる地点に設置し、その水温上昇から日だまり効果を確認する。今回の試験装置は試験容器を黒色に塗装しており、上向き短波放射(アルベド)を0として熱収支を計算する。そのため、水温の上昇エネルギーは地中伝導熱 G から顕熱・潜熱輸送量 $H \cdot \iota E$ を除いた数値として分析する。

以上より地表面温度は、入力放射量 R^{\downarrow} や蒸発効率 β 、顕熱交換速度 ChU に依存し、物質を水に統一することで、各地点における日だまり効果の影響を確認することができる(表1)。また、水面は水平を保つことができるため、本研究では水温を代表例とした。

図2に試験皿の概要を、図3に弱風点・強風点の実施状況を、表2に試験皿の確認実測の概要を示す。温度測定では、水中と表面では日照や対流による応答が異なると考えられるため、試験皿内の水面位置にサーミスタセンサーを設置して水面温度を測定し、放射温度計による温度を水温として測定する。

日だまり効果は、風速比(弱風/強風)に依存する。熱収支を用いた日だまり効果の確認のため、顕熱輸送量 H 、潜熱輸送量 ιE は水平方向の風速によって求めるバルク法にて算出する。本報では顕熱・潜熱輸送量の算出についてバルク法を用いるが、水面の熱輸送においては風上側の地表面の条件は入力せず、水面(バルク輸送係数:0.00145)として定め、熱輸送の計算式に入力する。バルク輸送係数について、フェッチが十分取れない場合は、フェッチが取れている場合と比べ、顕熱・潜熱輸送量ともに過大評価となるが、顕熱・潜熱輸送量の相対的な比較は可能である。

地中伝導熱 G は熱収支法により、熱収支の残差によって求める。本簡易測定装置によって風速に依存した日だまり効果が抽出できることを確認するために、以下では水温の風速依存性の確認、媒体を変更した場合の表面温度の影響、風速比と表面温度との関係を実験により分析する。

2-2. 水温の風速依存性の確認

風速に依存した試験皿の水温変化を確認する実験を行った。測定日条件として、晴天日で日射が得られる時間が対象となる。実験地では衝立の設置による防風とファンによる強制送風によって、意図的に風の弱い地点(以下弱風点)と風の強い地点(以下強風点)をつくり、比較した。また、測定日の日射量は平均 $200\text{W}/\text{m}^2$ であり、測定時間の7時間では強風点にて $0.16\text{mm}/\text{m}^2$ 程度の水量減であったと想定し、

表2 試験皿による測定概要

測定日	測定項目	機材	測定精度・測定高さ	測定間隔	備考
2011/12/10, 13.14, 2012/1/6.8, 9.10 (晴天日、 日射量のある 8:00~16:00)	気温	サーミスタセンサー付 データロガー	平均 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 高さ:1500mm	1min	強制送風式二重 通風管を使用
	相対湿度	高分子センサー付 データロガー	$\pm 5\%$ 高さ:1500mm	1min	自然送風式二重 通風管を使用
	表面温度	放射温度計	$\pm 2.5^\circ\text{C}$ 高さ:160mm	1hour	照り返し防止の 遮蔽板を取り付 けて測定
	風速	三杯式風向風速計	$\pm 0.5\text{m}/\text{s}$ 高さ:160mm	1min	
	下向き短波放射量(日射量)	放射収支計	$\pm 10\%$ 高さ:160mm	5sec	
	下向き長波放射量(大気放射量)	放射収支計	$\pm 10\%$ 高さ:160mm	5sec	

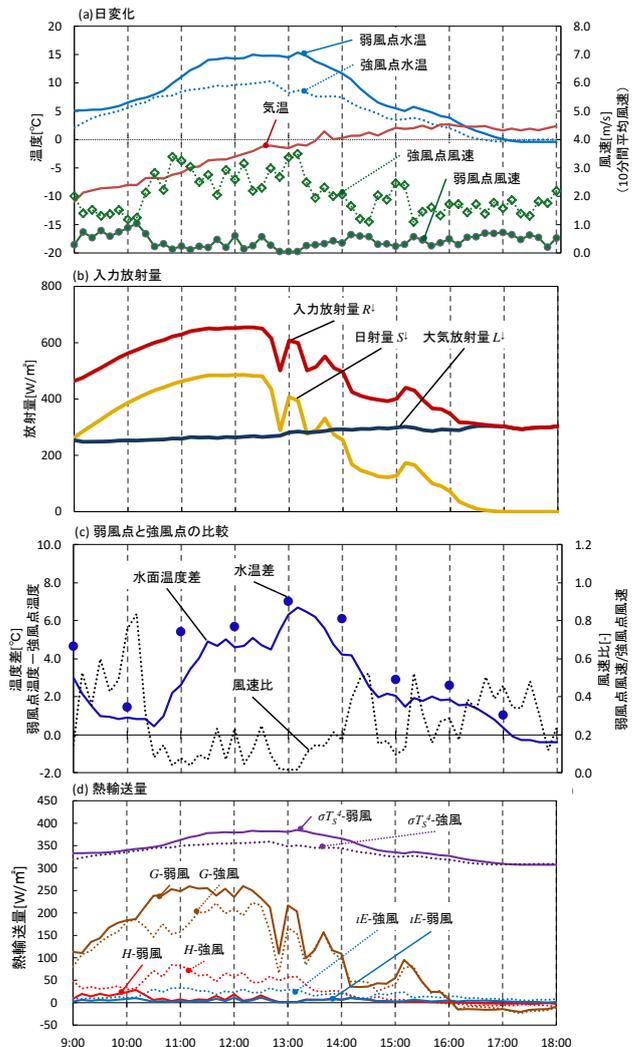


図4 試験皿(水)の実験結果(2012/1/6)

水温に大きく影響を及ぼすものでないと判断している。

図4に実験の結果を示す。図4(a),(b)より、入射日射量の増加によって弱風点の水温は上昇し、気温との差が大きくなる。日射量の最大値が12時頃に対し、水温差は13時頃に最大となる。これは、水温と気温の日変化に位相のずれが生じるためであり、文献¹⁵⁾に示される地表面温度と気温の日変化と一致する。

風速による温度変化の傾向は、風速比(弱風点風速/強風点風速)による水面温度の変化の応答が早く、1分の測定間隔で風速比による水温の影響が確認できる。

図4(a),(c)より、風速比が小さい時に弱風点と強風

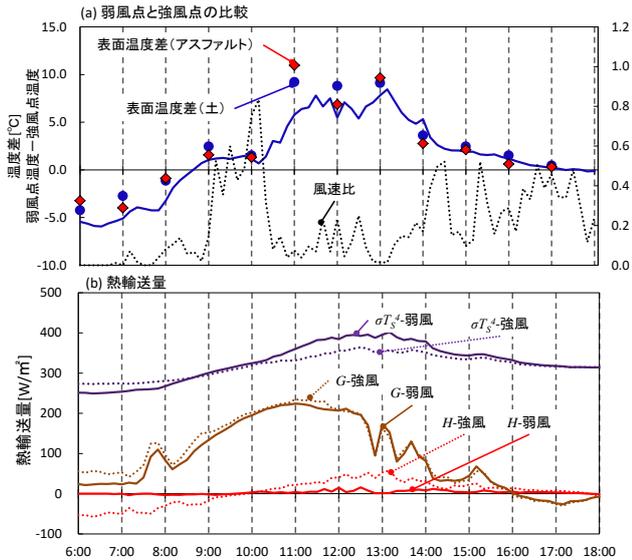


図5 試験皿(土・アスファルト)の実験結果(2012/1/6)

点の水面温度差が大きくなった。また、水面温度と気温の差が0に近づくとき、水面温度差は確認できなくなった。また、水温と水面温度では、放射温度計で測定した水温の方が1°C程度高く測定されるが、傾向は同じであった。そのため試験媒体を水で測定すれば、風速変化の応答は大きくなく、60分程度の測定間隔で測定をしても日だまり効果の影響を確認することは可能であると示された。

図4(b), (d)より、風が強く吹くことによって水温の上昇量に変化が生じ、それに伴って顕熱輸送量 H 、潜熱輸送量 E 、長波放射量 σT_s^4 、地中伝導熱 G に変化が生じている。よって、風速の増加が水面温度の降下要因となり、顕熱・潜熱輸送量の増加によって地表面に与えられるエネルギー(地中伝導熱 G)が小さくなっていることが分かる。以上より、日だまり効果による表面温度の上昇は、日射量、風速に依存していることが示され、本実験では強風点と弱風点で最大7°Cの水温差が確認された。

2-3. 物質を変更した場合の表面温度上昇量

地表面の物質を変更した場合の試料として、水以外の物質においても表面温度の上昇の程度、熱収支の影響を確認する。本実験では、水との比較として、蒸発効率 $\beta=0$ の乾燥土壌を選定したのは、実際の地表面は $0 < \beta \leq 1$ であるため、顕熱輸送量 H が最も高い場合で検討するためである。アスファルトを選定したのは、都市において最も多い地表面は道路の舗装に用いられるアスファルトと考え、本研究の対象とした。熱収支計算では、蒸発効率 $\beta=0$ であるため、潜熱輸送量 E は無視して計算を行った。

図5に物質を乾燥土壌とアスファルトに変更した際の図4と同様の実験結果を示す。測定日時、測定地は図4と同様の条件である。この例では、風速の違いによって日中は最大10°C程度の表面温度差が生じた。12時に表面温度が下がったのは、同時間帯で雲量が増えたためである。また、

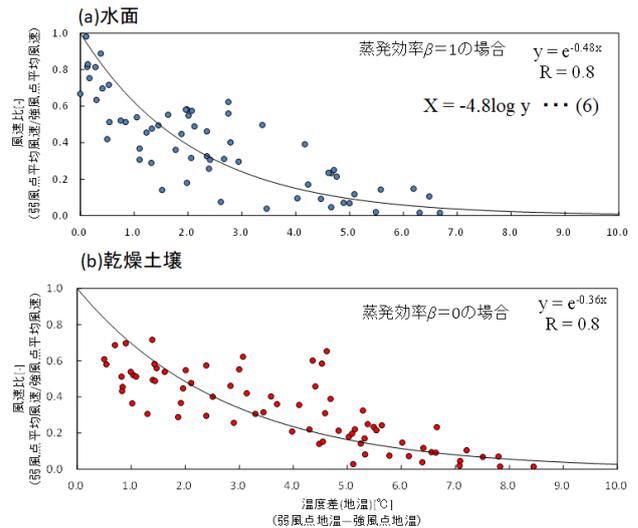


図6 風速比と表面温度差の関係

風速比が最も大きい11時頃で各物質とも10°C程度の温度差となった。さらに、アスファルトの表面温度は日射量の変化への依存が大きく、曇天時には1時間で5°C程度下がるが、乾燥土壌ではアスファルトほどの変化は大きくなかった。これは、物質のアルbedoによる入力放射量の違いが大きく関わるためであり、文献¹⁵⁾による理論と一致する。よって、乾燥土壌やアスファルトといった熱容量の比較的小さい物性では入力放射量 R^d の影響が大きく、その変化に合わせて表面温度の変化が大きい。風速によって顕熱輸送量 H に差が出ており、温度差は大きくなっている。そのため、日だまり効果の要因となる地中伝導熱 G は小さいと考えられる。

2-4. 風速比と表面温度差の関係

図6に水面と乾燥土壌における風速比と表面温度差の相関図を示す。ただし、水温(地温)と気温の差が5°C未満となると、顕熱・潜熱輸送量が小さくなり風速比との相関関係が見られないため、5°C以上を示した時の値を用いている。この時、顕熱輸送量の大小関係が逆転する時間は見られなかった。同図より、風速比が小さい(風速差が大きい)と温度差は大きくなり、風速比が大きい(風速差が小さい)と温度差は小さくなる傾向にある。さらに、温度差と風速比には指数関数的関係が確認された。よって、風速比が小さくなることにより、温度差は指数分布的に大きくなることを確認でき、水面温度変化においては図6中の式(6)によって風速比から日だまり効果の影響を確認することができる。例えば、風速比が0.5(風速が半分)となると水面温度差は1.45°C上昇することになる。また、乾燥土壌では、潜熱輸送の影響が無視できるために温度差は大きくなる^{注1)}。

以上の結果より、試験皿中の物質は日射量、風速に大きく依存して地表面温度を決定していることが確認できた。これは、1-3で述べた地表面熱収支の理論と一致し、本簡易測定装置を用いて測定することで、日だまり効果を定量

的に求めることができることが確認された。

3. 緑地広場における日だまり効果の確認

前章で開発した装置を用いて、実在する緑地広場にて日だまり効果を確認するための屋外実測調査を行う。本研究では、石川県金沢市の市街地に位置する金沢城公園周辺の緑地（約69ha）を対象地とする（図7）。金沢城公園周辺の緑地は都市内部に位置し、金沢市が保全区域に指定する重要な緑地である。この緑地では、夏季夜間において生成される冷気流が市街地へ流れることにより、市街地の熱環境緩和効果があることが確認されている¹⁶⁾。また、金沢城公園内においては樹木に囲まれた広場が存在し、その樹林（平均樹高20m）が防風林の効果を持っていることが推測される。

3-1. 実測の方法

日射の遮蔽効果の少ない広場において、樹木の日だまり効果の発現が推測される。そこで、金沢城公園新丸広場において日だまり効果の確認実測を行った（表3）。図8に示す通り防風林となる樹木近くを起点に、15m間隔で樹木から離れていくように計6点の試験皿を設置した。設置位置の選定については次節にて説明する。試験皿の媒体は前述の実験にて日だまり効果の確認に有利な水を用いた。実測は晴天で日中に測定装置にて風速が測定できる日を条件とし、実測日の状態を定点測定、測定装置毎の状態を移動実測にて記録した。

3-2. 樹林による風速低減域の推定に基づく試験皿設置位置の決定

近藤の風速低減域の報告¹⁷⁾より、実測地の防風林としての効果範囲を求める。防風林の効果は北風となった日（2011/8/10,12）の現地樹林の樹高 h と風下距離 x の各測定点における実測値から新丸広場の風速低減比を求めると図9(a)が作成できる。ただし、風上風速は金沢城公園から直線距離約3km離れた気象台（地上高さ50m）としたため（図7）、風速比（風下側の距離別風速/風上側風速）は過小評価されていることを考慮する^{注2)}。ここで、風速低減域は風下距離 x 樹高 h の割合で求めている。

新丸広場の防風林は密度が高く、防風林となる北側の樹木から南下約120mまで開けた広場であり、120m以南は芝の丘陵地となっている。そのため、図9(a)より、防風林となる樹木から離れると風は強くなるが、100m程離れると風が弱くなっている。この結果より、新丸広場では風下距離75m程で風速は最大となり、樹木側に近づくにつれて日だまり効果によって地表面温度が上昇すると推測できる。

以上の結果に基づき、新丸広場において北側防風林から芝生面の0~75m地点まで15m間隔で試験皿を計6点設置した（図8）。ただし、試験皿は地表面における媒体の温度・

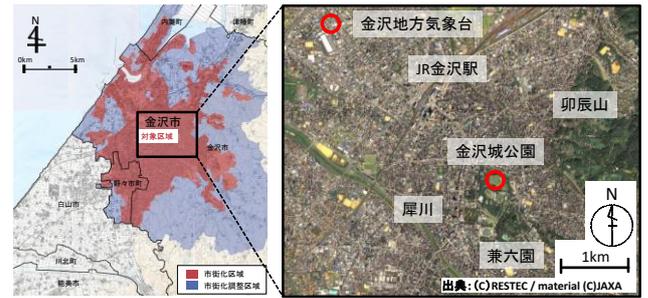


図7 実測対象地 石川県金沢市

表3 実測概要

測定日	測定項目	機材	測定精度	測定間隔	備考
2011/11/23, 27,28	表面温度	放射温度計	±2.0°C	1hour	照り返し防止の遮蔽板を取り付けて測定
	風速	熱線風速計	±0.1m/s	5sec	

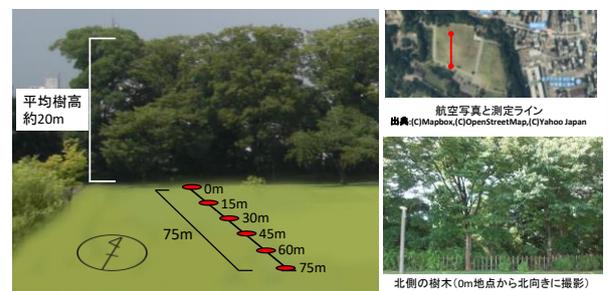


図8 日だまり効果確認実測の測定点

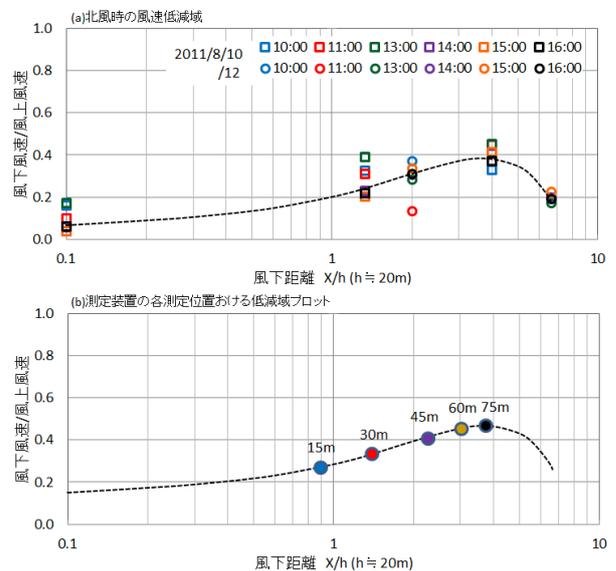


図9 新丸広場における風下距離と風速変化

風速条件以外を均一化するための装置であり、測定装置の水温上昇においては日射による下向き短波放射が強い影響を与えるため、日射の遮蔽に影響がない南側へ測定点を設ける。15m地点以降の天空面の樹木率は大きくなく、また樹木の表面温度は気温相当であることを熱画像撮影にて事前調査を行っている。よって、下向き長波放射は大きく影響を及ぼさず、風速以外の熱収支条件は各測定点で同様

と考へて分析する。

0m 地点の試験皿のみ、樹木直下のため日射の遮蔽効果が考えられるが、その他の地点では日射の遮蔽効果は得られない地点となっている。

また、図 9(b)では各測定点における風上からの風速低減の割合を示す。この風速低減の割合に基づき、各測定点の風速の差を求める。

3-3. 実測結果

前節の風速の低減域の調査から、樹木から 60~75m 程で風速が最大になっていることが確認できているため、75m 点までの測定点において各時間で 5 分間の平均風速を記録する移動実測を行った。水温の測定では、75m 点を基準として各地点の水温差を確認する。

図 10 に測定期間中に最も日だまり効果の影響が確認された 2011 年 11 月 27 日の結果を示す。日射が最大となった 11 時では、15m 地点と 75m 地点の水温差が 1.5℃となり、0m 地点を除き樹木から離れるにつれて水温が低下していた。0m 地点では直上の樹木によって日射が遮蔽されたため、他の地点より水温は低くなり、水温の変化量も小さくなった。主風向は 10 時~11 時頃までが北風となっているため、北側樹林の防風による日だまり効果が得られた。しかし、12 時以降も日射量は比較的大きいが、南風となったことで水温差も小さくなり、日だまり効果は確認されなかった。

実測結果が日だまり効果の影響であることを確認するために、図 11 より日だまり効果が確認された時間帯の各試験装置の温度変化を 3 章の実験結果の回帰式と重ね比較する。ここで、各測定点の風速比の割合は図 9(b)を用いている。試験装置の水温変化は図 11 で確認できるように 3 章の実験結果に基づく変化と一致した傾向を示しており、試験装置による水温変化は日だまり効果による影響であることが確認できる。

以上より、試験皿の実験による水温の風速依存性と新丸広場の風速低減域から、新丸広場では樹木が防風効果を発揮する風向条件の場合に日だまり効果が発生していることが確認できた。

4. 考察

本報は屋外の風速減少による表面温度及び熱収支変化を、試験体を用いて実測し、その装置の妥当性を示したうえで樹林の日だまり効果を確認した研究である。

屋外の実測においては、多様な要因が温熱環境に影響を与えている。その中で、試験皿を用いて地表面温度変化に着目し、熱収支傾向を抽出することが地表面温度の周囲気温に及ぼす影響を特定するための資料となると考へている。

2 章の実験結果から異なる地点の熱収支は風速(比)の差により起因する顕熱・潜熱輸送量の差によって水温(地中伝

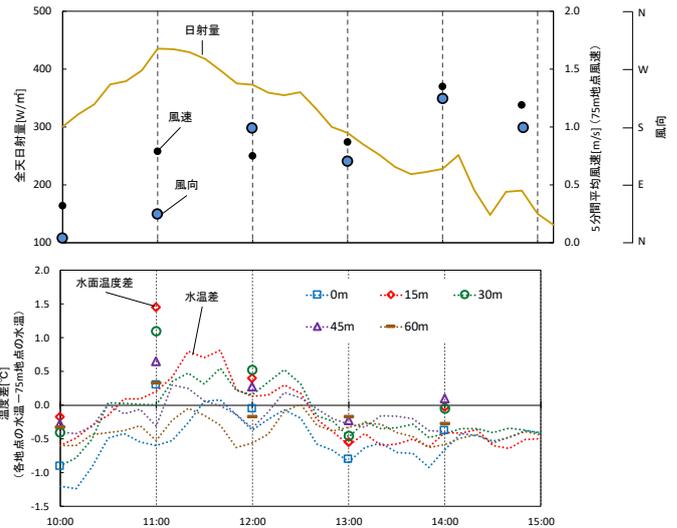


図 10 北側樹林と距離別の水温差の時間変化(2011/11/27)

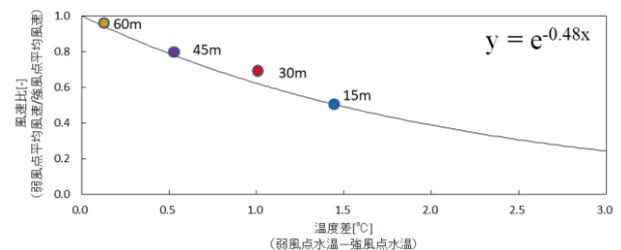


図 11 風速比と測定装置の水温差の関係(2011/11/27 11:00)
(回帰曲線と回帰式は図 6(a)のものを記載)

導熱)が上昇することでバランスを保つ。よって試験装置は日射量等の条件が同一の場合において、緑地広場に適用可能であり、実測結果も熱収支の理論に整合的なものであることが確認できる。しかし、より有効性を高めるうえでは、熱収支(フラックス)に基づく詳細な測定装置による分析との比較についても重要な課題と考へており、今後の課題として進めていきたい。また、3-2 節の試験装置の実験による風速比と熱収支の関係から、樹木から離れた地点では顕熱・潜熱輸送量の増加が推測できる。これは風速量の増加とともに顕熱輸送量が増加することで装置の水温に変化を与えると考えられる。

試験装置の実験では蓄熱、蒸発効率、傾度を均一化して熱収支測定を行い、風速の増加・減少による水温の変化に関する知見を得ることができた。その他の影響(例えば、実際の地表面における日だまり効果の強度や気温に与える影響)について分析を加えることは、屋外微気候の把握を行う上で不足している事項であり、今後の課題として進めていきたい。

風速の減少においては、近藤の報告¹⁶⁾と実測により樹林からの風速減少距離を求めた上で試験皿の測定点を決定し、防風林の風下における地表面熱収支の傾向を確認することができる。これは、樹木や建物に囲まれた都市エリアの熱環境の実態把握を行う際に、有益な方法になると考へる。

5. 結論

本研究では緑地の日だまり効果について着目し、試験皿の実験による水温と風速比の関係を抽出する簡易測定装置を開発した。さらに、金沢城公園新丸広場を対象地として日だまり効果の確認実測を行った。以下に得られた知見を示す。

(1) 試験皿による表面温度の実験より、風速の減少によって水温の上昇に約 7°C の変化が確認された。風速比 (弱風点風速/強風点風速) が大きい地点では、風速比が小さい地点と比べて表面温度の上昇が小さい。さらに、熱収支計算より、風速が低い地点では、顕熱・潜熱輸送量が減少して表面温度と地中伝導熱量が上昇する効果が確認された。よって、風速の変化により日だまり効果が発現することが示され、簡易測定装置によって日だまり効果の傾向を捉えられることを確認した。

(2) 日射量が大きく、水面 (地表面) 温度と気温との温度差が 5°C 以上の時、風速比と水面温度差の関係は指数分布に沿って近似していることが確認された。

(3) 金沢城公園新丸広場において風速の低減域を求めた。新丸広場において、樹林が防風に働く場合、風速が最大となるのは樹高約 20m の北側樹林から 60~75m 程であることが確認された。この風下距離と風速低減域の関係は、樹高も考慮されており、既往研究の風速低減域と傾向が一致した。

(4) 同広場において日だまり効果の確認実測を行った結果、日射量が大きく樹林が防風となった場合に樹林に近づくにつれ、試験皿の水温が上昇する傾向が確認された。実測日では、日射量が最大となった時間に 15m 地点と 75m 地点の水温差が 1.5°C となった。よって、樹林による防風効果により日だまり効果が発現していることを確認した。

注記

注 1) 実測結果より、乾燥土壌ではサーミスタ温度計と放射温度計の結果に 1°C 以上の差が得られた。放射温度計の値を考慮すると、表面温度差ではさらに大きい温度差が生じている可能性がある。

注 2) 金沢城公園は城址公園のため周辺より標高が高くなっており、周辺都市部と比べて都市キャノピー層による風速の乱れは小さいと考えた。夏季の風向の測定では、測定時間内で金沢城公園内の風向は気象台の風向と概ね一致していることを確認している。

謝辞

本研究を実施するにあたり、東北大学名誉教授 近藤 純正先生に有益なご指導ご助言をいただきました。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) ヒートアイランド対策大綱：環境省，2004.3
- 2) 吉田伸治，村上周三，持田灯，大岡龍三，富永禎秀，金相璠：対流・放射・湿気輸送を連成した屋外環境解析に基づく緑化の効果の分析，日本建築学会計画系論文集，第 529 号，pp.77-84，2000.3
- 3) 近藤純正ホームページ，K45. 気温観測の補正と正しい地球温暖化量，<http://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/index.html>(閲覧日 2020.12.06)
- 4) 石黒光，高木直樹：全国の気象観測点における周囲 300m の範囲内の土地被覆状況と地域微気候の関係，日本建築学会環境系論文集，第 644 号，pp.1173-1178，2009.10
- 5) 高木直樹：気象観測点における気温上昇と風速変化の関係，日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)，pp.927-928，2010.7
- 6) Hirofumi SUGAWARA, Junsei KONDO : Microscale warming due to poor ventilation at surface observation stations, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, volume 36, pp.1237-1254, 2019.7
- 7) 竹林英樹，森山正和，芝池英樹：夏季夜間における山麓冷気流の市街地熱環境緩和効果に関する研究，日本建築学会環境系論文集，第 591 号，pp.69-74，2005.5
- 8) 鳴海大典，水野稔，中村安弘，下田吉之，比嘉博：冷気流の発生構造把握のための実測調査研究 丘陵地周辺の住宅地域に及ぼす冷気流の影響 その 1，日本建築学会計画系論文集，第 543 号，pp.85-91，2001.5
- 9) 成田健一，菅原広史：都市内緑地の冷気のにじみだし現象，*地学雑誌 Journal of Geography* 120(2), pp.411-425, 2011
- 10) 浅輪貴史，梅干野晁，武澤秀幸，清水敬示：緑の茂った戸建住宅地の屋外空間に形成される夏季の微気候に関する実測調査 屋外空間の微気候と居住者の開放的な住まい方との関わりに関する研究 その 1，日本建築学会計画系論文集 第 563 号，pp.77-84，2003.1
- 11) 小高典子，梅干野晁：屋敷林を有する砺波散居に形成される夏季の微気候に関する実測調査研究，日本建築学会環境系論文集，第 659 号，pp.75-81，2011.1
- 12) 例えば，佐藤隆光，2002：防風林の構造が気象改良効果に及ぼす影響に関する研究．北海道大学大学院農学研究科邦文紀要，24 (2)，113-164．(博士論文 2000)
- 13) 加賀英資，梅干野晁：航空機 MSS 画像を用いた地表近傍風の可視化-砺波平野散居を対象として-，日本リモートセンシング学会第 45 回(平成 20 年秋季)学術講演会論文集，pp.207-208，2008.12
- 14) 近藤純正：水環境の気象学，朝倉書店，pp.151-152，1994.4
- 15) 近藤純正：地表面に近い大気科学，東京大学出版会，pp.116-117，2000.9
- 16) 北原俊史，円井基史，高木直樹：兼六園・金沢城公園から市街地に下る 3 本の道路上における気温と風向・風速分布：金沢市における市街地内緑地から生成する夏季夜間の冷気流に関する実測調査その 2，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1，pp.755-756，2011.7
- 17) 近藤純正ホームページ，K-56. 風の解析-防風林などの風速低減域，<http://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kenkyu/ke56.html>(閲覧日 2020.12.06)

(Received January 10, 2021, Accepted October 6, 2021)