

論文

沖縄本島北部の森林微気象環境に関する研究^{*1} —暑さ指数 (WBGT) の導入について—

壁谷直記^{*2}・清水 晃^{*2}・新垣拓也^{*3}・古堅 公^{*4}・漢那賢作^{*5}
 清水貴範^{*6}・飯田真一^{*6}・生沢 均^{*4}・田中憲蔵^{*7}・宮本麻子^{*6}

壁谷直記・清水 晃・新垣拓也・古堅 公・漢那賢作・清水貴範・飯田真一・生沢 均・田中憲蔵・宮本麻子：沖縄本島北部の森林微気象環境に関する研究—暑さ指数 (WBGT) の導入について— 九州森林研究 77: 125—128, 2024 南西諸島の各島では、海岸から山地までの水平距離が多くの場合 5 km 以内という比較的狭い空間的スケールのなかで、多様なタイプの森林が生育している。沖縄県森林資源研究センターと（国研）森林総合研究所では、2010 年より“やんばるの森”を対象とした高精度高時間分解能の森林環境モニタリングシステムを共同で開発・構築し、森林環境の準リアルタイムモニタリングを継続してきた。さらに、海と山が近く、多くの海岸に囲まれているという沖縄県の島嶼としての特性をより詳細に観測することを目的として、新たに海岸林サイトを対象としてモニタリングを開始した。本研究では、そこで得られた海岸林の微気象特性に関して報告するとともに、暑さ指数 (WBGT) の導入について検討した。その結果、林内が汀線と陸側に比べて安定的な微気象環境であることが示された。

キーワード：微気象、海岸林、暑さ指数 (WBGT)

I. はじめに

2010 年より“やんばるの森”を対象にして沖縄県森林資源研究センターと（国研）森林総合研究所が共同で開発してきた高分解能高時間分解度の森林環境モニタリングシステムを活用して、森林環境の準リアルタイムモニタリングを継続してきた（清水ほか 2011; 壁谷ほか 2016; 新垣ほか 2017, 2018, 2020）。この森林環境モニタリングシステムでは、沖縄本島北部地域の森林における微気象・水文に関する包括的な環境情報を、高精度のセンサーにより、5 分間インターバルという高時間分解度の時系列データとして取得してきている。一方で、このシステムで微気象データとして取得される日射量、気温、湿度という物理値に関しては、その値を公開して個別の要素の変動を知ることができたとしても、森林での作業や一般の住民には十分に活用されない可能性が高い。そこで、本研究では、一般の人にわかりやすい微気象データの指標として、暑さ指数 (WBGT) を本モニタリングシステムへ導入することを検討した。

暑さ指数 (WBGT) とは、熱中症予防の指数として広く知られており、近年では、気象予報でも地点別の暑さ指数が公開されるなど、広く認知されている。この指標は、ヒトの熱中症予防のために開発されたものである。しかし、ヒトをふくめた多くの生物は地表から 1~2 m の高さの生息環境に大きく依存している。Oke (1981) は、「動物は、変温動物、恒温動物に係わらず環境温度が上昇すると代謝速度が上昇する。また、多くの哺乳動物の体温は 35~40 °C、鳥類は 40~43 °C の間にあり、大気の時

度上限に近い。環境温度が体温以上になる場合、過熱を防ぐために熱を消散させる手段（血行、姿勢変化、発汗など）は不十分である。そのため、動物たちは通常の体温を 5 °C 以上上回るだけで環境温度上昇による体温上昇が発生してしまう（≡上昇が続けば生命の危険となる。）と述べている。また、川崎 (1973) は「鶏体に及ぼす湿度の影響は一般に温度と密接に関連して作用する。環境温度が高く、湿度が高い高温多湿の条件下では、体熱の放散に影響して体温が上昇しやすく鶏体に悪影響を与える。」と述べている。以上のことから、個別の気象要素（温度、湿度、日射量など）の変動を統合した森林環境を示す指標として、従来、熱中症対策などで暑さストレスの指標として活用されてきた暑さ指数 (WBGT) の導入を試みた。

II. 調査地および方法

1. 調査地

本研究での観測は、名護市喜瀬の海岸林に設置した海岸林サイトにおいて実施した（図-1）。このサイトは、森林環境モニタリングシステムにおいて実施してきた沖縄本島北部地域の森林微気象観測サイトと比較する目的で、2021 年 10 月に設置した。

汀線側の観測地点を基点として、海岸林を横断して陸側の観測地点まで水平距離 65 m の直線プロットを設定した。汀線側の観測地点から海岸林は水平距離で 10 m~35 m（林帯幅 25 m）に位置し、水平距離 27 m の海岸林中央部に林内観測地点を設定した。また、陸側の林縁から 30 m 離れた、水平距離 65 m の位置

^{*1} Kabeya, N., Shimizu, A., Arakaki, T., Furugen, H., Kanna, K., Shimizu, T., Iida, S., Ikuzawa, H., Kenzo, T., Miyamoto, A.: Research on forest micrometeorological environments in northern part of Okinawa Island - implementation of heat index (WBGT) -

^{*2} 森林総合研究所九州支所 Kyushu Res. Ctr., For. & Forest Prod. Res. Inst., Kumamoto 860-0862

^{*3} 沖縄県農林水産部 Okinawa Pref. Agriculture, Forestry and Fisheries General Affair Division, Naha 900-8570

^{*4} 公益社団法人 沖縄県緑化推進委員会 Inc. Okinawa Pref. Afforestation Promotion Committee., Naha 901-1105

^{*5} 沖縄県農林水産部森林資源研究センター Okinawa Pref. For. Resour. Res. Ctr., Nago 905-0017

^{*6} 森林総合研究所 For. & Forest Prod. Res. Inst., Ibaraki 305-8687

^{*7} 国際農林水産業研究センター JIRCAS, Ibaraki 305-8686

の開空地に陸側の観測地点を設定した（図-2）。

この海岸林は、2005年に県の海岸林造成事業で造成されたものであり、平均の林帯幅は30 mである。海岸林の前縁部には、クサトベラやアダン（樹高2～4 m）、海岸林本体の上層木にはナンヨウスギ、モモタマナ（樹高10 m程度）などがあり、下層木にはクロヨナ、ネズミモチ（樹高2 m）などが見られた。当初、植栽されたモクマオウは衰退して、わずかに2個体のみが残存していた。しかし、前縁部のクサトベラやアダンから、海岸林本体上層木のナンヨウスギ、モモタマナまで、連続した切れ目ない流線形の林冠を形成していた（図-2）。

各地点では、観測項目として Ta ：自然通風乾球温度（℃）、 Rh ：自然通風相対湿度（%）、 Sr ：全日射量（ kW/m^2 ）、 Ws ：風速（m/s）、黒球温度 Tg （℃）をロガー Onset 社 マイクロステーションロガーセンサーおよび同社のスマートセンサーシリーズおよび HOBO Pro v2 シリーズによって記録した（表-1）。設

表-1. 微気象測定の見測項目と使用センサー

観測項目（単位）	センサー（型式）
自然通風乾球温度（ Ta , ℃）	ラジエーションシールド（RS-3, 米国オンセット社） & 湿度計（S-TMB-M 002, 米国オンセット社）
自然通風相対湿度（ Rh , %）	湿度計（S-TMB-M 002, 米国オンセット社）
全日射量（ Sr , kW/m^2 ）	日射計（S-LIB-M 003, 米国オンセット社）
風速（ Ws , m/s）	風向計（S-WDA-M 003, 米国オンセット社）
黒球温度（ Tg , ℃）	黒球（直径15 cm, C-BB-15 cm クリマテック社） & HOBO Pro v2（U 23-003, 米国オンセット社）



図-1. 観測地点の位置（名護市喜瀬海岸林）

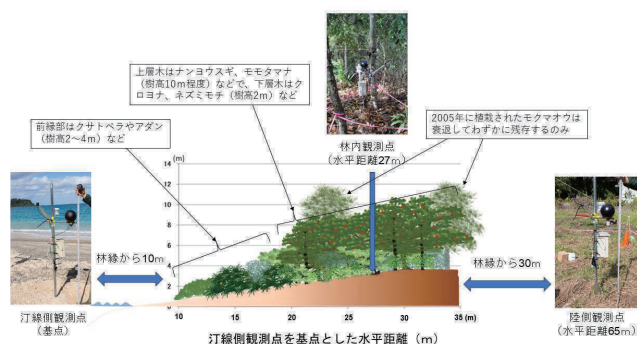


図-2. 名護市喜瀬に設置した海岸林サイトの様子（カッコ内の数値は、汀線側観測地点を基点とした水平距離）

注）植生の高さ、分布範囲は森林調査結果に基づき描画。

置高度は、地表より高さ140 cmとした。記録間隔は1分サンプリング、5分間平均値を記録した。各センサー出力値のうち、特に重要な温度、湿度に関しては、携帯アスман式通風乾湿計により精度のチェックを行った。海岸林サイトは、観測を2021年11月24日に実施した。測定時の風向はN350度で海側から海岸林にほぼ直交する風向であった。また気圧は1022～1024 hPaで、日中の天気は晴天だった。

2. 暑さ指数の算出方法

1) 暑さ指数の定義

野外における暑さ指数（WBGT；Wet Bulb Globe Temperature；湿球黒球温度（Yaglou & Minard, 1957））は次の式1により計算される。

$$WBGT = 0.7 Tw + 0.2 Tg + 0.1 Ta \quad (1)$$

ここで、 Tw は自然通風湿球温度（℃）である。この値のヒトに対する熱中症の危険度は表-2に示す通りである。

2) 微気象観測値による暑さ指数（WBGT）の推定方法

既往研究により一般の気象観測要素から暑さ指数を推定する方法が提案されている。本研究では、小野・登内（2014）による一般気象要素による推定式（式2）を用いた。

$$WBGT = a Ta + b Rh + c Ta Rh + d Sr - e Ws - f \quad (2)$$

小野・登内（2014）では、WBGT値の算定には、本来、自然通風条件で測定した乾球、湿球温度を用いるべきであるが、測定値がないことや観測環境の影響を受けやすいことから強制通風条件で測定した乾球温度、相対湿度で代用している。本研究では、自然通風乾球温度および相対湿度を測定しているため、この値を用いた。

a～fについては、小野・登内（2014）が示した $a = 0.718$, $b = 0.0316$, $c = 0.00321$, $d = 4.363$, $e = 0.0502$, $f = 3.623$ とした。

以上の式2に各プロットで観測した微気象観測値を入力して、暑さ指数（WBGT）の推定値を算出した。なお、小野・登内（2014）は日射による誤差影響を補正するための推定式（式3）も示しているが、本報では、まず、植生、立地条件が大きく異なる汀線側、林内側、陸側の3地点におけるWBGT推定値がどの程度異なるのかを把握することを第一の目的としているためより簡便な式2を用いた。

表-2. 暑さ指数（WBGT）を用いた熱中症危険度の目安（日本生気象学会（2022））

WBGT	危険度
31℃以上	危険
28～31℃	嚴重警戒
25～28℃	警戒
25℃未満	注意

Ⅲ. 結果と考察

1. 海岸林サイトにおける観測結果

1) 微気象環境の時間変化

海岸林サイトの微気象環境の時間変化を図-3 および図-4 に示した。日射量は、汀線側と陸側の日中の値は最大で 800 W/m^2 程度で同等の値を示した（図-3）。これに対して林内は、日中でもほとんど日射量は上昇しなかった。風速は、汀線側で $2 \sim 4 \text{ m/s}$ であったが、林内と陸側ではほとんどゼロ付近で推移した。相対湿度は、林内がもっとも高く 60% 前後を示した。これに次いで汀線側が高く、陸側は最も低かった。

乾球温度は、日中の陸側で高く、最大で 23°C 程度であった。汀線側と林内では、 20°C 前後で一定の値を示した（図-4）。黒球温度は、日中、陸側で最も高く最大で 40°C 程度まで上昇した。次に汀線側で高く最大で 27°C 程度まで上昇した。林内では、 20°C 程度と一定の値を示してほとんど変化しなかった。

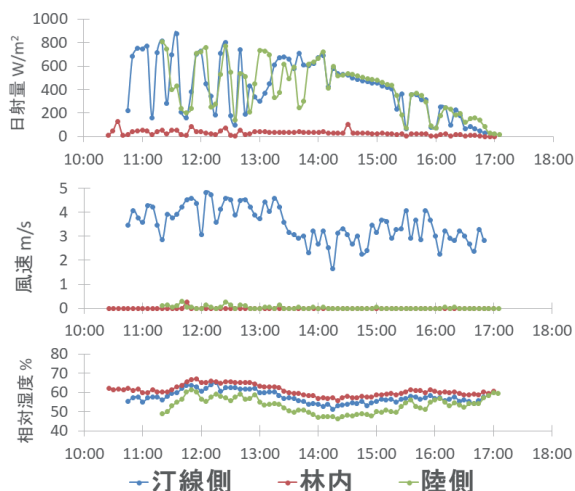


図-3. 海岸林サイトにおける微気象データ（日射量、風速、相対湿度）の時間変化（2021年11月24日、晴天）

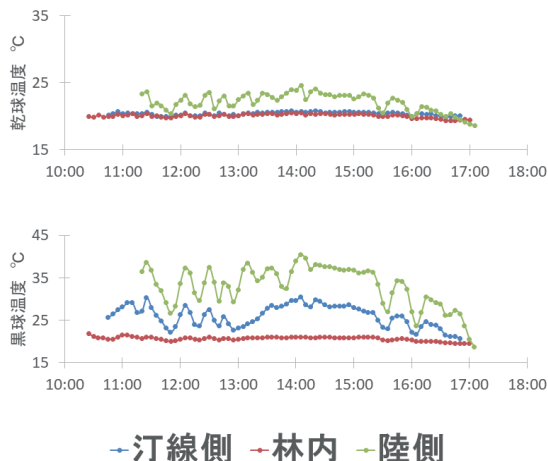


図-4. 海岸林サイトにおける微気象データ（乾球温度、黒球温度）の時間変化（2021年11月24日、晴天）

2) WBGT 推定値の時間変化

各プロットの微気象観測値を式2に入力して算出した WBGT 値の推定値を図-5 に示した。この図では、陸側の WBGT 推定値が最も高く、次に汀線側が高いことがわかる。林内の値は、日中も他の2地点とは異なり大きく上昇することなく、一定の値を示した。乾球温度が高い、陸側の WBGT 推定値が高くなることは当然のことだが、乾球温度の差が見られなかった、汀線側と林内でも WBGT 推定値の傾向は、異なっていた。汀線側と陸側について考えると、ともに植生など林冠被覆がない開空地であるため日射量は同じく高かった。一方で、汀線側は、風速が高いために、日射を受けて地表面付近の温度が上昇しても、これに伴って発生する顕熱が盛んに輸送されるため、黒球温度はそれほど高くならなかった。一方、陸側は海岸林により風がほとんど遮られるために風速がゼロ付近となった。このため、日射によって温められた地上付近の空気が拡散しにくくなり、黒球温度も高くなったと考えられた。林内は、植生による林冠被覆が日射を遮るために、林内の乾球温度と黒球温度がともに一定となり、海からの風も防がれるために相対湿度も高い状態で維持された。これらの結果、林内は、汀線側や陸側に比べて一日を通じて安定した WBGT 推定値が維持されたと考えられた。

Ⅳ. 結論

海岸林の汀線側、林内、陸側の3地点で観測した微気象観測値を用いて、小野・登内（2014）の方法により WBGT 推定値を算出した。その結果、林内は林冠被覆のないエリア（汀線、陸側）よりも一日を通して安定した微気象環境に保たれていることがわかった。測定対象の林帯幅は 25 m とそれほど広くなかったが、植栽したモクマオウが衰退した林分でも前縁部のクラトベラやアダンから続く、海岸林本体上層木のモモタマナやナンヨウスギによる連続した流線形の林冠により、高い防風効果を有していると考えられた。林冠により日射が遮られることにより、林内の気温、湿度は一日を通じて安定していた。

本研究が示した結果は、海岸林の本来機能である防風機能に加えて、林内微気象の緩和機能の一端を示したものと考えられる。本研究は長い海岸線を有する沖縄における重要な景観要素である海岸林における微気象環境を明らかにするとともに、ここで導入

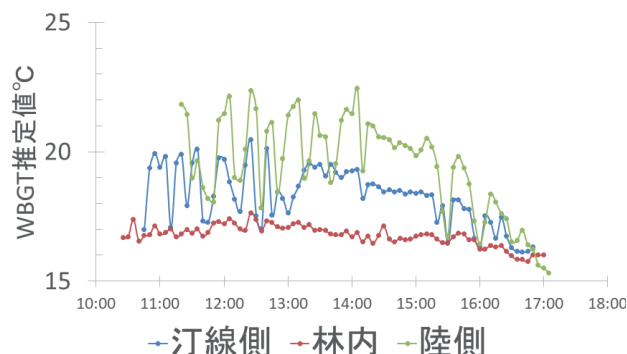


図-5. 海岸林サイトにおける暑さ指標（WBGT 推定値）の時間変化（2021年11月24日、晴天）

に関する検討を行った暑さ指数（WBGT）が、海岸林や一般森林のレクリエーションへの活用や森林の維持・管理における作業の際の環境を考慮するうえで、有効な指標になる可能性を提示した。

今後は、WBGT 値の推定精度の検討を行うとともに、山地の森林サイトでの微気象観測データを利用して、海岸林サイトと森林サイトの比較を行う予定である。

謝辞

現地観測、測器の設置に関して沖縄県農林水産部森林資源研究センターの皆様に多大なご協力を頂いた。本研究は、「南西諸島の環境保全及び生物相に配慮した森林管理手法に関する研究事業」および「沖縄県における森林分布現況把握と森林タイプ毎の環境・機能観測評価」の一環として行った。

引用文献

新垣拓也ほか（2017）沖縄本島北部森林地域における森林環境把握のための各種施業後の森林状況調査. 九州森林研究 70:101-

103.

新垣拓也ほか（2018）沖縄本島北部森林地域における各種施業実施後の森林現況について（Ⅰ）. 九州森林研究 71:39-42.

新垣拓也ほか（2020）沖縄本島北部森林地域における各種施業実施後の森林現況について（Ⅱ）－施業後の経過年数、造林樹種の異なる林分の構造－. 九州森林研究 73:69-73.

壁谷直記ほか（2016）沖縄本島北部の森林伐採に伴う林内微気象環境の変化. 九州森林研究 69:65-70.

川崎晃（1973）鶏の環境と生理. 鶏病研究会報 9:7-16.

Oke, T.R. (1981)「境界層の気象」佐藤直輔・新田尚（訳）, 朝倉書店, 324 pp

小野雅司, 登内道彦（2014）通常観測気象要素を用いた WBGT（湿球黒球温度）の推定. 日本生気象学会誌 50（4）:147-157.

日本生気象学会（2022）日常生活における熱中症防指針 ver 4, 21 pp

清水貴範ほか（2011）沖縄本島北部の施業履歴が異なる森林内における微気象環境の比較. 九州森林研究 64:108-109.

Yaglou, C.P., Minard, C.D. (1957) Control of heat casualties at military training centers. Arch. Ind. Health, 16:302-316.

（2023 年 11 月 1 日受付；2024 年 1 月 18 日受理）