

## 論文

沖縄本島北部森林の熱収支法による蒸発散量推定<sup>\*1</sup>新垣拓也<sup>\*2</sup>・清水 晃<sup>\*3</sup>・壁谷直記<sup>\*3</sup>・古堅 公<sup>\*4</sup>・清水貴範<sup>\*5</sup>・飯田真一<sup>\*5</sup>・生沢 均<sup>\*6</sup>

新垣拓也・清水 晃・壁谷直記・古堅 公・清水貴範・飯田真一・生沢 均：沖縄本島北部森林の熱収支法による蒸発散量推定 九州森林研究 72：57－60，2019 沖縄県北部森林地域は亜熱帯島嶼環境下の貴重な生態系を持つ地域であると同時に、林業の中心地である。本地域の世界自然遺産登録が目標となっている中、今後森林施業の在り方と環境保護について、両立した森林の利活用が求められているが、本地域の森林環境を評価する上で重要な森林気象や熱収支の研究事例は少ない。森林資源研究センターでは2009年より本地域において気象観測露場を開設し、森林気象と水環境を評価するために必要な要素の継続観測を行っている。これに加えて、2013年より微気象観測タワーを用いた観測を開始した。本論では、微気象観測タワーの観測値から、熱収支ボーエン比法を用いて、2014年の本地域における森林の蒸発散量を推定した。その結果、2014年の森林の蒸発散量は944.1 mm/yearと算出された。季節毎に蒸発散量を比較すると、夏季339.6 mm、冬季126.4 mmであった。

キーワード：亜熱帯島嶼環境、微気象観測タワー、熱収支ボーエン比法、蒸発散量、世界自然遺産

## I. はじめに

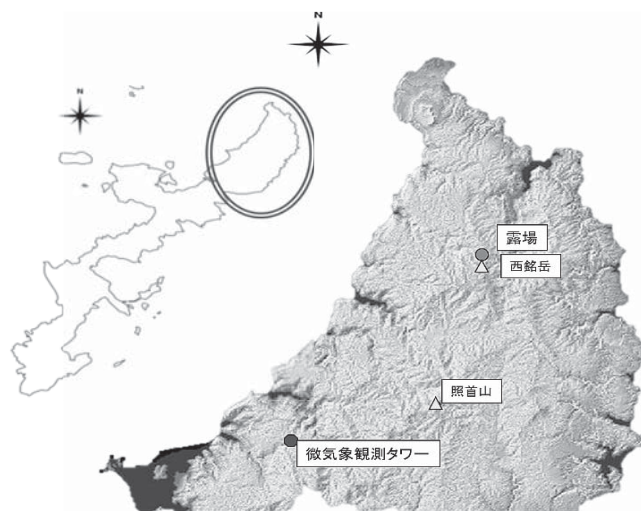
沖縄島は亜熱帯性気候に属する島嶼環境下にある。そのため、沖縄島北部地域にある森林地帯（通称ヤンバルの森）はこの地域特有の生態系を有しており、この場所にのみ生息する固有種や希少動植物が数多く生息している地域である。このように、非常に特殊な環境に位置することから、奄美大島、徳之島、沖縄島北部および西表島を合わせた琉球弧として世界自然遺産登録を目指す運動が活発に行われている。しかしながら、古くから建築材や炭等の森林資源活用を目的とした造林や伐採管理が行われてきた地域でもある。現在も森林施業が実施され、本島の林業の中心地域となっている。また、本地域の森林は水源林としてダム群を有し、全島の水瓶として重要な働きを果たしている。そのような背景から、森林施業・管理と環境保護の双方が両立した持続的な利活用が求められている。しかし、本地域の森林環境を評価する上で重要な、森林気象や森林の熱収支、水収支に関する研究事例は少なく、長期間継続観測した事例はほとんど無い状態である。

そのような背景の中、沖縄県森林資源研究センターでは、森林の気象環境と熱収支、水収支についてデータを取得するため、森林総合研究所九州支所および琉球大学の協力のもと、本地域の気象・熱収支環境のモニタリングシステムの構築と継続観測を行っている（清水ほか，2011；比嘉ほか，2011；壁谷ほか，2014；清水，2016；壁谷ほか，2017）。観測内容として、2009年に本地域における気象観測露場を開設すると共に、施業履歴の異なる林分における林内微気象観測サイトを設置した。次に、2013年に気象観測露場を再整備し、露場での純放射量測定を始めるとともに、琉球大学演習林内に設置された微気象観測タワーを用いた熱収支

計測を開始した。それぞれの観測は2018年現在も継続しており、データの蓄積を行っている。気象観測露場を用いた測定結果については九州森林研究において何度か報告を行ってきた（新垣ほか，2013；新垣ほか，2014）。今回は微気象観測タワーにおいて2014年1月から12月まで観測したデータから、熱収支ボーエン比法を用いて推定した通年の蒸発散量について報告する。

## II. 調査地と方法

観測は、沖縄県国頭郡国頭村与那に位置する、琉球大学農学部付属亜熱帯フィールド科学教育研究センター与那フィールドが管



図－1. 観測タワー位置図および調査対象地域起伏図

<sup>\*1</sup> Arakaki, A., Shimizu, A., Kabeya, N., Hurugen, H., Shimizu, T., Iida, S., Ikuzawa, H., : Forest evapotranspiration estimation by energy balance method in northern part of Okinawa Island.

<sup>\*2</sup> 沖縄県森林資源研究センター Okinawa Pref. For. Resour. Res. Center., Okinawa 905-0017, Japan

<sup>\*3</sup> 森林総合研究所九州支所 Kyushu Res.Center., For. & Forest Prod. Res. Inst., Kumamoto 860-0862, Japan

<sup>\*4</sup> 元沖縄県環境科学センター Inc. Okinawa Pref. Environment Science Center., Okinawa 901-2111, Japan

<sup>\*5</sup> 森林総合研究所 For. & Forest Prod. Res.Inst., Ibaraki 305-8687

<sup>\*6</sup> 沖縄県農林水産総務課 Okinawa Prefectural Government Agriculture, Forestry and Fisheries General Affair Division., Okinawa 900-8570, Japan

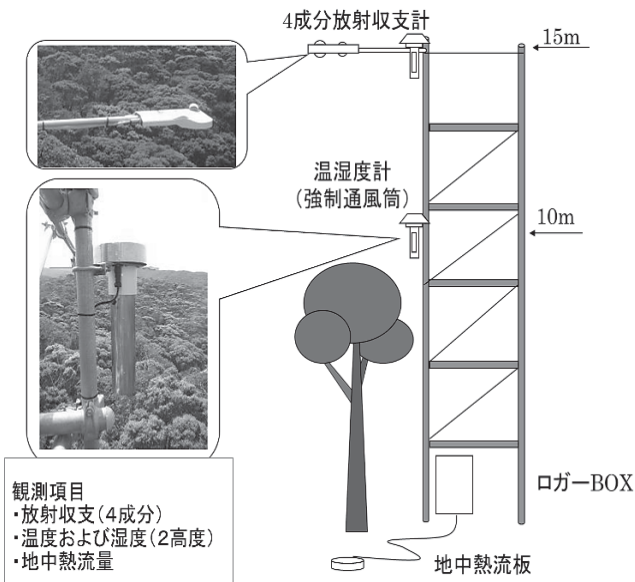


図-2. 微気象観測タワー概要および熱収支計測機器配置

理する与那演習林79林班は小班(北緯26度45分, 東経128度12分, 標高約210m)に設定された微気象観測タワーで行った。位置図を図-1に示す。タワー設置箇所は沖縄本島の西海岸線から直線距離で約1.5kmの位置にあり, イタジイ(*Castanopsis sieboldii*)が優占する亜熱帯常緑広葉樹二次林内である。タワーの地上高は約15m, 設置箇所の林冠高は約10mであった。

この観測タワーにおいて林冠より上部の位置で, 2つの高度の気温(乾球温度:℃)と相対湿度(%)を観測し, 最頂部で対象森林における純放射量( $W/m^2$ ), 林床で地中熱流量( $W/m^2$ )の計測を行った。温湿度センサー(Visala社, HMP-155D)は内部に電動式ファンが内蔵されている通風シールド(PREDE社, 縦型通風筒PVC-04)に納め, 森林の林冠最上部(地上高10m)とタワー最上部(地上高15m)にそれぞれ1台ずつ, 計2台設置した。タワー上部には4成分の放射収支計(KIPP&ZONEN社, CNR4)を設置した。放射収支計は微気象観測タワーや他の観測機器から干渉を受けないように南側にアームを突出し, その先に設置した。なお, 計測された4成分の放射収支の値から純放射量が計算され, ロガーに記録されるようにプログラミングしている。林床には地中熱流板(PREDE社, PHF-02型)を設置し, 地中熱流量を計測した。気象観測タワーの概要および測器の配置図を図-2に示す。各センサーの観測値は10秒ごとに計測され, 10分毎の平均値を一括してデータロガー(Cambell社, CR1000)に記録した。各観測機器, 通風シールド, データロガーの電源は微気象観測タワーへ敷設した商用電源より確保している。さらに, 停電等の緊急対策のために予備バッテリー(GS YUASA社, 小型制御弁式鉛蓄電池, PE12V7.2)を取り付けた。

得られた観測データを用いて, 熱収支ボーエン比法(EBBR)より沖縄本島北部地域における森林の蒸発散量を算出した。使用したデータは, 2014年を対象とした。熱収支ボーエン比法による蒸発散量(mm)の計算方法は服部(1985)に従った。計算式は(1)の通りである。また, 本論では $R_N$ (純放射量) $>0$ の場合のみの要素を用いて計算を行った。ここで,  $E$ は水蒸気フ

ラックス(水蒸気輸送量)であり, 以降では, 蒸発散量として取り扱う。

$$\lambda E = \frac{R_N - G}{1 + \beta} \quad \dots (1)$$

$\lambda$ : 水の蒸発潜熱 ( $J \cdot g^{-1}$ )

$E$ : 水蒸気フラックス

$R_N$ : 純放射量 ( $W/m^2$ )

$G$ : 地中熱流量 ( $W/m^2$ )

蒸発散量を求める式(1)の $\beta$ はボーエン比といわれるもので, 式(2)のように, 温湿度計を配置した10mと15mの2高度の温度差, 湿度差から求めることができる。

$$\beta = \gamma \frac{T_{dl} - T_{du}}{e_l - e_u} \quad \dots (2)$$

$T_{dl}$ : 高度10m(下)で観測した乾球温度(℃)

$T_{du}$ : 高度15m(上)で観測した乾球温度(℃)

$e_l$ : 高度10m(下)における水蒸気圧(hPa)

$e_u$ : 高度15m(上)における水蒸気圧(hPa)

2高度での水蒸気圧 $e_u$ は相対湿度から以下の式(3)によりそれぞれ求めることができる。

$$e = \frac{RH \times e_s}{100} \quad \dots (3)$$

$RH$ : 観測した相対湿度(%)

$e_s$ : 飽和水蒸気圧(hPa)

2高度での飽和水蒸気圧 $e_s$ は, 岡田式(岡田, 1985)を用いて, 式(4)からそれぞれを求めることができる。

$$e_s = \exp(a_0 + a_1 T_d + a_2 T_d^2 + a_3 T_d^3 + a_4 T_d^4) \quad \dots (4)$$

$a_0 = 1.809378$

$a_1 = 0.07266115$

$a_2 = -3.003079 \times 10^{-4}$

$a_3 = 1.181765 \times 10^{-6}$

$a_4 = -3.863083 \times 10^{-9}$

ボーエン比 $\beta$ を求めるために必要な $\gamma$ は乾湿係定数( $hPa \cdot ^\circ C^{-1}$ )であり, 以下の式(5)で求めることができる。

$$\gamma = \frac{C_p \cdot P}{0.622 \cdot \lambda} \quad \dots (5)$$

$C_p$ : 空気の定圧比熱 [ $1.0042 J^\circ C^{-1}$ ]

$P$ : 大気圧(hPa), 1013 hPaにて計算

水の蒸発潜熱 $\lambda$ は2高度の温度を使用して算出した。

$$\lambda = 2500.8 - 2.3668 \times \frac{T_{du} + T_{dt}}{2} \quad \dots (6)$$

上記の計算式に基づき、日蒸発散量を算出し、春季（3月、4月、5月）、夏季（6月、7月、8月）、秋季（9月、10月、11月）、冬季（1月、2月、12月）の4つの季節毎に取りまとめた。なお、観測データから純放射量が正の値となる場合を対象に、式（7）により晴天時と曇天時の熱収支を算出した。

$$Rn = H + \lambda E + G \quad \dots (7)$$

H：顕熱フラックス（W/m<sup>2</sup>）

なお、今回蒸発散量を算出するにあたり、純放射量が正の値（Rn > 0）の条件下のデータを用いて計算を実施した。したがって、降雨が発生した日も計算を行っている。本邦ではこれらを積算して、年間の蒸発散量を積算している。

### Ⅲ. 結果と考察

測定された純放射量 Rn について、晴天時の平均値は春季 696.5 W/m<sup>2</sup>、夏季 766.7 W/m<sup>2</sup>、秋季 676.7 W/m<sup>2</sup>、冬季 575.4 W/m<sup>2</sup>、曇天時の平均値は春季 319.1 W/m<sup>2</sup>、夏季 375.0 W/m<sup>2</sup>、秋季 314.1 W/m<sup>2</sup>、冬季 285.8 W/m<sup>2</sup>であった。

この結果から、冬季と夏季について平均的な値となった日を代表的な晴天、曇天日として、1日の熱収支変動を図-3、4、5、6に示した。その結果、冬季の晴天時では、純放射量は最大 528 W/m<sup>2</sup>まで上昇した。冬季の潜熱フラックスの最大値は 234.1 W/m<sup>2</sup>、顕熱フラックスの最大値は 350 W/m<sup>2</sup>、地中熱流量の最大値は 38.3 W/m<sup>2</sup>であった。いずれも12時から13時の間に最も高くなった。曇天時、純放射量は12時30分に最大 571.2 W/m<sup>2</sup>まで上昇した。また、潜熱フラックス（蒸発散に対応）の最大値は 223.3 W/m<sup>2</sup>、顕熱フラックスの最大値は 349.2 W/m<sup>2</sup>、地中熱流量は 15.6 W/m<sup>2</sup>であった。曇天時はいずれの項目も値の増減幅が大きい状態であった。

夏季の晴天時では、純放射量は最大 834.9 W/m<sup>2</sup>まで上昇した。潜熱フラックスの最大値は 624.4 W/m<sup>2</sup>、顕熱フラックスの最大値は 258.6 W/m<sup>2</sup>、地中熱流量の最大値は 52.5 W/m<sup>2</sup>であった。純放射量は12時から13時30分の間に高い値を示した。夏季の曇天時では、純放射量は最大で 821.9 W/m<sup>2</sup>の値を示したが、日中の値の増減が安定せず、15時頃から安定し始めていた。この日の潜熱フラックスの最大値は 595.1 W/m<sup>2</sup>、顕熱フラックスの最大値は 214 W/m<sup>2</sup>、地中熱流量の最大値は 40.6 W/m<sup>2</sup>であった。7月の晴天時、曇天時の放射収支観測結果からは、夏季は潜熱フラックスが純放射量の3分の2以上を占めていたが、1月の晴天時、曇天時の放射収支観測結果から、冬季は顕熱フラックスが純放射量の3分の2程を占めており、潜熱フラックスよりも割

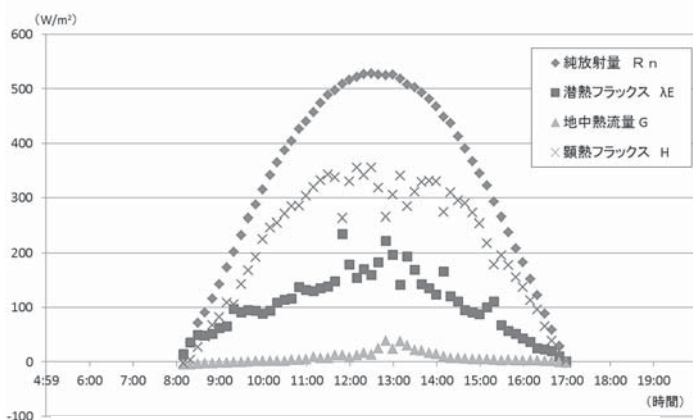


図-3. 冬季 晴天時の熱収支の日変化 (2014/1/1)

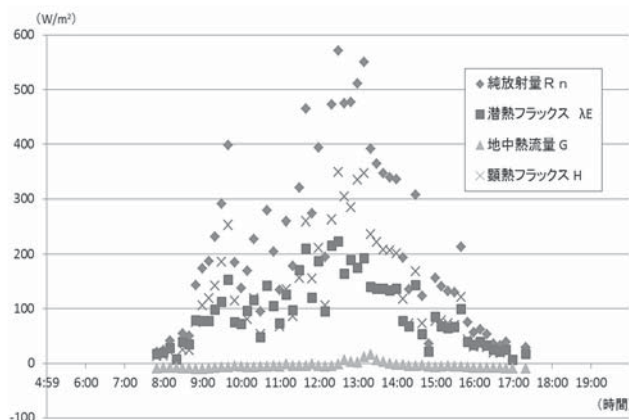


図-4. 冬季 曇天時の熱収支の日変化 (2014/1/15)

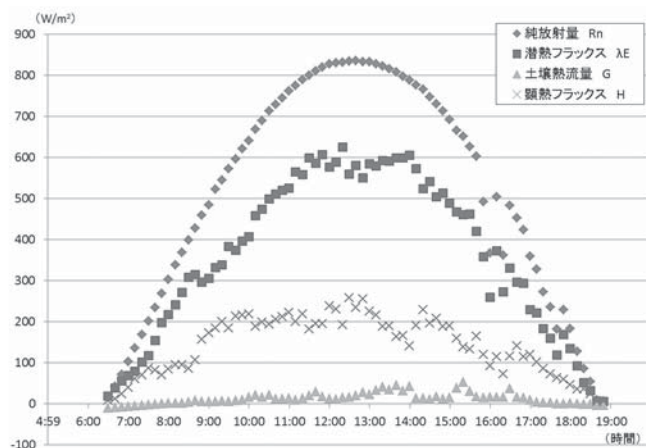


図-5. 夏季 晴天時の熱収支の日変化 (2014/7/15)

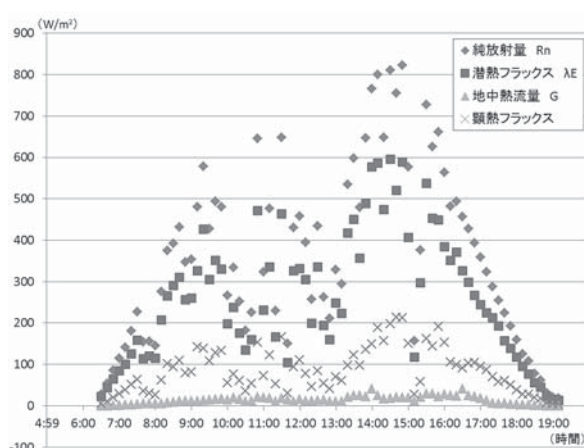


図-6. 夏季 曇天時の熱収支の日変化 (2014/7/12)



合が高かった。以上のことから冬季晴天時に対し夏季晴天時では純放射量と潜熱フラックスの最大値が大きく上昇し、曇天時でも潜熱フラックスは純放射量の大半を占めており、森林では蒸発散が活発に行われている可能性が示された。冬季は、純放射量に対し、潜熱フラックスよりも顕熱フラックスの割合が高くなり、純放射量も夏季の6割程度となっており、蒸発散量が夏季に比較して小さい結果となっている。これは、熱収支式で得られるエネルギー総量が冬季に減少することに加えて、降水量の減少で土壌水分量が減少していることによるものと思われる。なお、気象観測露場で観測された2014年の降水量は3753 mmであり、夏季と冬季を比較すると、それぞれ1533.5 mm、453.5 mmと冬季の降水量が減少した(2014年、露場での降水量計測値：新垣、未発表)。また、土壌の極端な乾燥によって起こる蒸発抑制については、2014年はボーエン比が最大でも2以下に抑えられていたことから発現していないと推察される(服部、1985)。しかしながら、1年間の測定結果であるため、今後も測定を続け、他の年での熱収支量について取りまとめていく必要がある。

観測データから算出した2014年の日平均蒸発散量について、春季を3月・4月・5月、夏季を6月・7月・8月、秋季を9月・10月・11月、冬季を1月・2月・12月として取りまとめた(表-1)。春季の日平均蒸発散量は2.53 mm、夏季の日平均蒸発散量は3.68 mm、秋季の日平均蒸発散量は2.62 mm、冬季の日平均蒸発散量は1.4 mmであり、夏季が最も蒸発散量が多く、冬季が最も蒸発散量が少なかった。2014年の蒸発散量は944.1 mm/yearであった。このことから、対象地域の蒸発散量は夏季に高くなり、冬季に低くなる可能性が示された。

#### IV. まとめ

2014年の観測結果より、今までほとんど解明されていなかった亜熱帯島嶼環境下にある常緑広葉樹林の年蒸発散量の推定値を獲得することができた。これらの結果より、曇天時でも蒸発潜熱は純放射量の大半を占めており、活発に蒸発散が行われていると考えられる。また、冬季は純放射量に対して潜熱フラックス(蒸発散に使われるエネルギー輸送量)よりも顕熱フラックスの割合が大きくなることがわかった。2014年の年間の蒸発散量は944.1 mm/yearであり、季節毎に見ると、夏季が最も高く、冬季が最も低い値となった。また、冬季は夏季に比べて純放射量も6割程度となっており、蒸発散量もその変動に伴い減少したと考えられる。

表-1. 微気象観測タワーにおける日平均蒸発散量の季節変化

季節(月)	平均日蒸発散量(mm)	積算蒸発散量(mm)
春(3・4・5月)	2.53	235.8
夏(6・7・8月)	3.68	339.6
秋(9・10・11月)	2.62	242.3
冬(1・2・12月)	1.40	126.4
合計		944.1

※  $R_n > 0$ の時のみの値の積算値

本データは森林環境に特有の気象条件を反映した蒸発散量観測結果に基づいており、本地域の森林環境を正確に評価するうえで重要な基盤的要素となるものである。今回は2014年の蒸発散量の推定のみ行ったが、数年にわたる継続観測を実施していることから、各年の観測データを取りまとめることで年変動や台風等の気象インパクトが森林に与える影響についてより現実的な評価を得ることができると考えられる。このことから、観測の継続と解析により、本地域の包括的な森林管理において重要な環境情報の整備が大きく前進するものと思われる。

#### V. おわりに

本研究は「南西諸島の環境・生物相に配慮した森林管理手法に関する研究事業」の一環として行った。モニタリングシステムの構築および維持・解析に関して、森林総合研究所の皆様にご協力を頂いた。また、微気象観測タワーの設立および管理に関して、琉球大学農学部、琉球大学農学部附属与那フィールドの皆様のご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

#### 引用文献

- 新垣拓也ほか(2013)九州森林研究 66: 21-24  
 新垣拓也ほか(2014)九州森林研究 67: 40-44  
 岡田益己(1985)農業気象, 40: 407-409  
 服部重昭(1985)林試研報 332: 139-165  
 比嘉幹彦ほか(2011)九州森林研究 64: 139-165  
 壁谷直記ほか(2014)九州森林研究 67: 37-39  
 壁谷直記ほか(2017)九州森林研究 70: 39-44  
 清水晃(2016)山林 1589: 17-25  
 清水貴範ほか(2011)九州森林研究 64: 108-109  
 (2018年11月9日受付; 2018年12月26日受理)