

論文

沖縄島北部森林の山地露場観測によるペンマン可能蒸発散量の推定^{*1}新垣拓也^{*2}・生沢 均^{*2}・古堅 公^{*3}・清水 晃^{*4}・壁谷直記^{*4}・清水貴範^{*5}

新垣拓也・生沢 均・古堅 公・清水 晃・壁谷直記・清水貴範：沖縄島北部森林の山地露場観測によるペンマン可能蒸発散量の推定
九州森林研究 66：21－24，2013 沖縄本島北部地域は亜熱帯特有の生態系を持つ我が国でも珍しい森林地域であると同時に沖縄県の林業の中心地となっているが、この森林地域の環境を測定した結果はまだ少ない状況である。そこで、沖縄県国頭村の西銘岳周辺に設置された気象観測露場のデータを用いて、生物の生育環境に多大な影響を有する森林の蒸発散量について、ペンマン式の適用を検討した。計算に際して一部直接測定が困難な要素について、既存研究成果を組み合わせることにより算出可能とする方法を案出した。その結果、一般的な気象要素に基づいて沖縄県北部森林地域のペンマン可能蒸発散量を算出することができた。蒸発散量の変動傾向は11月から2月の冬期に低くなり、5月から9月の夏期に高くなり、三浦・諸泉（2007）による那覇市での可能蒸発散量推定と整合的であった。

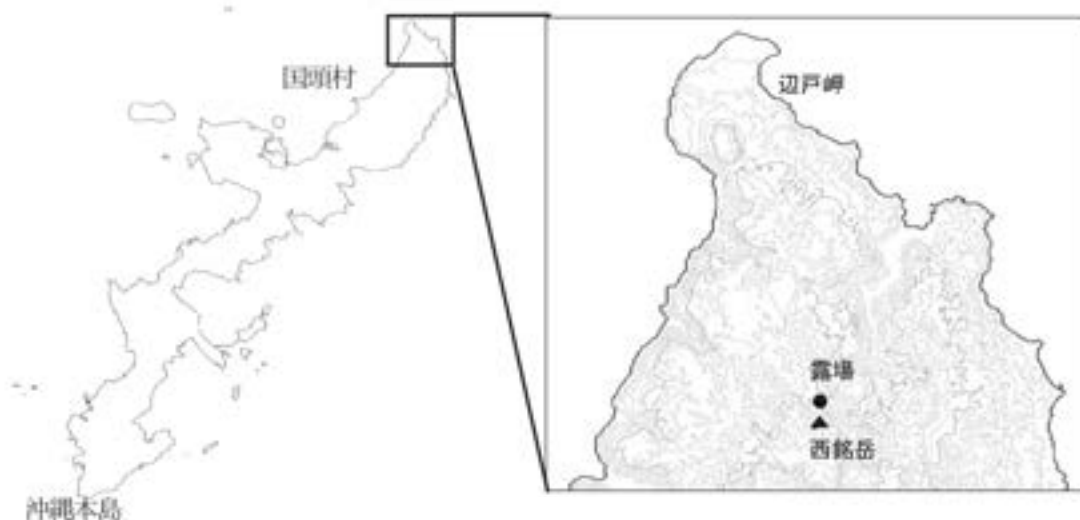
キーワード：島嶼環境、気象観測露場、ペンマン式、可能蒸発散量、日射量

I. はじめに

沖縄県北部地域は、亜熱帯島嶼特有の生態系を持ち、豊かな自然環境を保全することにより、観光産業が活性化されることが期待されている。一方、北部地域は沖縄県の林業の中心地となっており、木材の生産拠点や温暖化防止に寄与する炭素吸収源としての積極的な森林施業が求められている。そのため、林業と観光産業等への寄与を通じて地域の活性化を図る観点から、自然環境保全と木材資源の利活用の両立が今後の持続的発展を遂げる上で緊急な課題となっている。

しかしながら、動植物の生息基盤である森林の環境を測定した

結果は少なく、実際どのような環境になっているのかはよく分かっていない。このような状況に対して筆者らは2009年から本森林地域に気象観測露場を設置するとともに様々な森林タイプ毎に林内気象の観測を開始した。すでに清水ほか（2011）や比嘉ほか（2011）により、成果の一部は発表されているが、年間変動や季節変動の再現性などの点からも継続観測資料の充実は重要であり、観測要素を拡大しつつ研究を継続している。本報では、継続観測資料のなかで基盤的位置を占めている沖縄県国頭村の西銘岳周辺に設置されている気象観測露場のデータを用いて、生物の生育環境に多大な影響を有する森林の蒸発散量についてその季節変動等をペンマン式の適用により検討したので報告する。



図－1. 気象観測露場の設置位置図

^{*1} Arakaki,T., Ikuzawa,H., Hurugen,H., Shimizu,A., Kabeya,N., Shimizu,T.: Estimation of potential evapotranspiration using Penman Method in the northern part of Okinawa Island.

^{*2} 沖縄県森林資源研究センター Okinawa Pref. For. Resour. Res. Ctr., Okinawa 905-0017, Japan.

^{*3} 一般財団法人沖縄県環境科学センター, Inc. Okinawa Pref. Environment Science Ctr., Okinawa 901-2111, Japan.

^{*4} 森林総合研究所九州支所 Kyushu Res. Ctr., For. & Forest Prod. Res. Inst., Kumamoto 860-0862, Japan.

^{*5} 森林総合研究所 For. Forest Prod. Res. Inst., Ibaraki 305-8687, Japan.



図-2. 観測機器配置図

II. 調査地および調査方法

1. 調査地

図-1に沖縄県北部地域に設定した気象観測露場の場所を示した。気象観測露場は、沖縄県北部森林のほぼ中央部に位置する沖縄県国頭村の西銘岳の山頂から約500m北側のチヌフク林道沿い(北緯26°48'39", 東経128°16'23")にあり、林道建設時に造成された残土上のオープンスペースを活用しており、周囲の林分による直接的な影響を受けない場所となっている。

2. 観測機器

2009年3月に露場の設営が完了し、各種気象要素の観測が開始されている。図-2のように、風向・風速、全天日射、温・湿度の各センサーは基礎ブロックおよびコンクリートで固定された三脚を土台として鉛直方向に設置したポールを利用して取り付けられている。全天日射計(デルタオーム社, LP PYRA 03)、風向・風速計(MetOne社製, 034 B)は、ポールから南北方向に伸びたアームにそれぞれ取り付け(地上高約3m)、温・湿度計(Vaisala社製, HMP-45A)は直接ポールに取り付けた(地上高約1.5m)。温・湿度計のシールド内部にはファンが取り付けられており、ソーラーパネルから充電される充電電池により駆動するシステムとなっている。また、山地での降水量を測定するために露場内に転倒弁式雨量計(ウイジン社製, U-Dot)も設置している。雨量計の設置高は地上約1.5mである。

風向・風速、全天日射、温・湿度、降水量の各データは一括してデータロガー(キャンベル社製, CR1000)に記録される。雨量計を除く要素の測定インターバルは10秒であり、これを10分毎に平均してロガーに書き込む設定とした。また、雨量データは10分間の積算値が記録された。使用したデータロガーのバッテリーはポールに取り付けたソーラーパネルから充電されるもので安定した動作が確認できている。なお、露場の気象観測機器をリュウキュウイノシシなどの害獣から守るため、計測に影響がないように考慮して柵を建てて取り囲み、システムを保護した。

3. ペンマン式による可能蒸発散量計算の概要

一般にペンマン式による蒸発散位の算出には、地域気象台等の気象官署で測定される様々な種類の気象要素を必要とするが、山地において一般的にはこのような観測はほとんど見られないのが現状である。筆者らの気象観測露場においてもペンマン式の計算に必要なすべての要素を測定することはできなかったが、日照時間関連の要素を除いて概ね必要な計算項目を観測しているため、直接測定が無い部分については所有の観測要素から推定する方法を考案して計算を行った。なお、ペンマン式による蒸発散位とは、「水面や十分湿潤な草丈の短い草地からの日蒸発散量」のことで、その地点から蒸発可能な最大値と見なされることから可能蒸発散量とも言われる。そこで、今回の計算は沖縄北部森林地域において地表面が十分に湿潤である場合の可能蒸発散量を求め、本地域の蒸発散量の指標を得ることを目的とした。

対象としたデータは2010年の気象観測露場の観測値である。観測露場は遠隔地の山地にあるため、欠測や機器のトラブルが不可避であった。そこで可能蒸発散量については、すべての要素が安定して取得できた日から、各月毎に日射量の多い上位5日を選んで計算を行った。観測値である気温 t 、相対湿度 RH 、地上高3m地点での風速 u 、全天日射計の数値 Rad は日単位での平均値をベ計算に適用した。なお、ペンマンの計算式については、多くの研究で計算されているが、今回は三浦・奥野(1993)及び服部(1985)に従った。以下に計算式を示す。

$$ET_{pen} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{S}{\ell} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot f(u) (e_{sa} - e_a) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ET_{pen} : ペンマンの蒸発散位 (mm)

S : 純放射量 ($MJ \cdot m^{-2}$)

$S = (1 - \alpha) Qa (0.18 + 0.55n/N)$

$$- \sigma (t + 273.2)^4 (0.56 - 0.092 \cdot 0.866\sqrt{e_a}) (0.1 + 0.9n/N) \dots (2)$$

Qa : 大気圏外日射量 ($MJ \cdot m^{-2}$)

Δ : 気温 t での温度飽和水蒸気圧曲線の勾配 ($mbar \cdot ^\circ C^{-1}$)

γ : 乾湿計定数 ($= 0.66 mbar \cdot ^\circ C$)

ℓ : 水の蒸発潜熱 ($MJ \cdot kg^{-1}$)

$$\ell = 2.5 - 0.0024 \times t$$

$f(u) (e_{sa} - e_a)$: ダルトン方蒸発量推定式

$$f(u) = 0.26 (1 + 0.54u)$$

u : 地上高2mでの日平均風速 ($m \cdot s^{-1}$)

e_{sa} : 気温 t における飽和水蒸気圧 (mbar)

$$e_{sa} = 06.1078 \exp\left\{\frac{17.2694t}{t+237.3}\right\}$$

e_a : 空気の水蒸気圧 (mbar)

$$e_a = e_{sa} RH / 100$$

t : 気温 ($^\circ C$)

RH : 相対湿度 (%)

α : 地表面のアルベド

σ : ステファンボルツマン定数

$$= 4.9 \times 10^{-9} MJ \cdot m^{-2} \cdot K^{-4} \cdot d^{-1}$$

n : 日照時間

N : 日照時間

先述したように、計算に必要なすべての要素の測定値は無いので以下のように計算を行った。純放射量 S について、気象観測

露場のシステムの中に純放射量および日照時間を測定する測器が設置されていないため、下記の方法で純放射量を推定した。(2)式の第1項は短波放射に関わる項目なので(3)式のように修正し、全天日射計による観測値とアルベド(0.2)を用いて算出した。

$$S = (1 - \alpha) \cdot Rad - \sigma (t + 273.2)^4 (0.56 - 0.083\sqrt{e_a}) (0.1 + 0.9^t/N) \dots\dots (3)$$

Rad: 全天日射量 (Wm^{-2})

(3)式の第2項は有効放射量に関わる項目であり、日照時間が必要なため、以下の方法で求めた。 n (日照時間)を求めるために直達日射量が必要である。そこで、紙井ほか(2001)から沖縄県那覇市の全天日射量率と直達日射量率の関係により直達日射量を求めた。紙井ほかによると、沖縄県那覇市の全天日射率の平均値は0.41、直達日射率の平均値は0.18であるので、全天日射量に比率0.4390($= 0.18 / 0.41$)を乗ずることで直達日射量を得た。得られた直達日射量から閾値 $120 W \cdot m^{-2}$ 以上の値を積算し、日照時間 n および日照時間 N を求めた。

なお、第1項については(2)式の Qa (大気圏日射量)を用いる方法(紙井ほか, 2001; 三浦・奥野, 1993)もあるため、一部この方法で計算し、実測値の精度を確認した。

Ⅲ. 結果と考察

計算を実施した2010年について、各気象要素の月毎の変動を図-3から図-6に示した。これらから、2010年の気象状況として、平均気温については7月から8月にかけて $25^{\circ}C$ 以上と高く、最も高い月は8月で $27.4^{\circ}C$ 、最も低い月は1月で $14.5^{\circ}C$ であった。平均風速については年間を通して $1m/s$ から $1.8m/s$ 吹いて

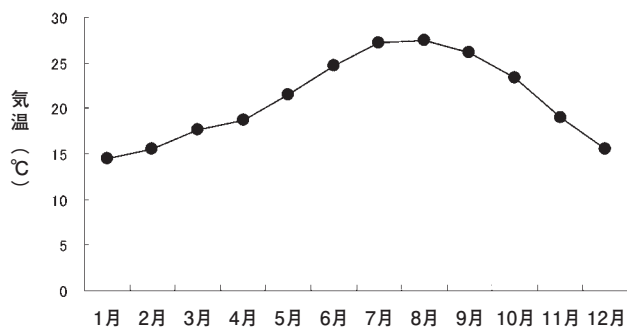


図-3. 2010年 平均気温 (°C)

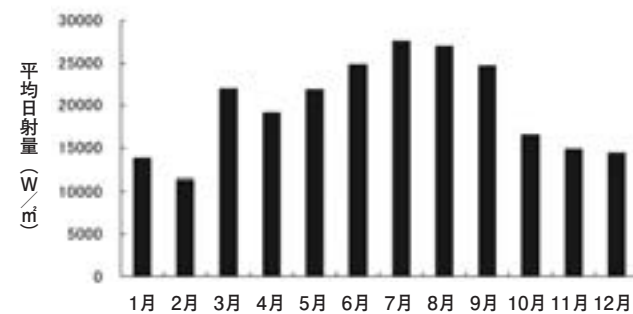


図-4. 2010年 平均日射量 (W/m^2)

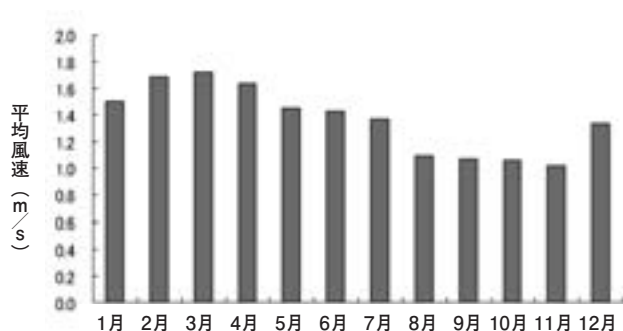


図-5. 2010年 各月の平均風速

おり、2月から4月に高くなる傾向が読み取れる。また、全天日射量については7月が最も高く、6月から9月に高くなる傾向が見られた。さらに平均日照時間についても同様に6月から9月にかけて長くなり、最大月は8月の6.9時間、最小月は2月の2.6時間となり、時間の差は4.3時間程度といった傾向が得られた。2010年はこのような傾向を持つ年であることがわかるが、これが平年値であるかについてはさらなるデータの集積が必要である。

2010年における沖縄県北部森林地域の月ごとの可能蒸発散量 (mm/d)の計算結果を図-7に示す。可能蒸発散量は12月がもっとも少なく、続いて1月、11月が少なかった。可能蒸発散量は6月から7月にかけて高い数値を示し、7月が最も高い数値となった。三浦・諸泉(2007)は、那覇市を含む全国9都市の気象台での平年値をもとにペンマンの可能蒸発散量を計算している。それによると、沖縄県那覇市での可能蒸発散量は今回の計算結果と同様に7月が最も高く、1月、12月が最も低い傾向にあった。表-1に今回、得られた可能蒸発散量の値と三浦・諸泉(2007)による那覇市の可能蒸発散量(アルベド $\alpha=0.06$)の値とを比較した表を示した。両方の値を比較すると、1月、11月、12月は今回の計算結果の方が可能蒸発散量は少なかったが、他の月では今回の数値の方が大きくなった。また、可能蒸発散量の増減傾向はほぼ同じ傾向が見られた。

これまで全く得られていなかった沖縄県北部森林地域における蒸発散量についてペンマンの可能蒸発散量を算出することができ、降雨-流出測定による水収支項目とも併せて活用することが可能となった。森林の蒸発散量は、森林環境における水分状態を説明する主要な要素であり、土壌水分等の変動にも直接関わるものである。これについて、年間変動傾向や総量の指標が得られたこと

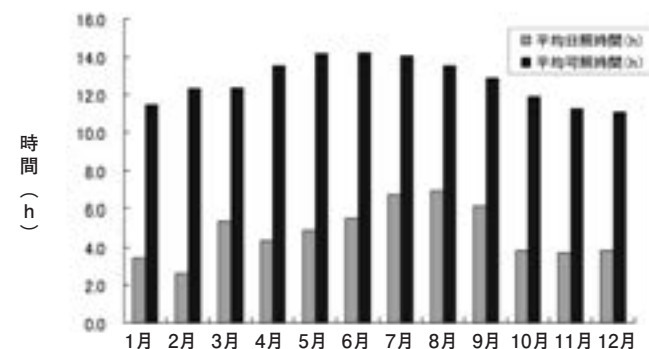


図-6. 2010年 月毎の平均日照時間

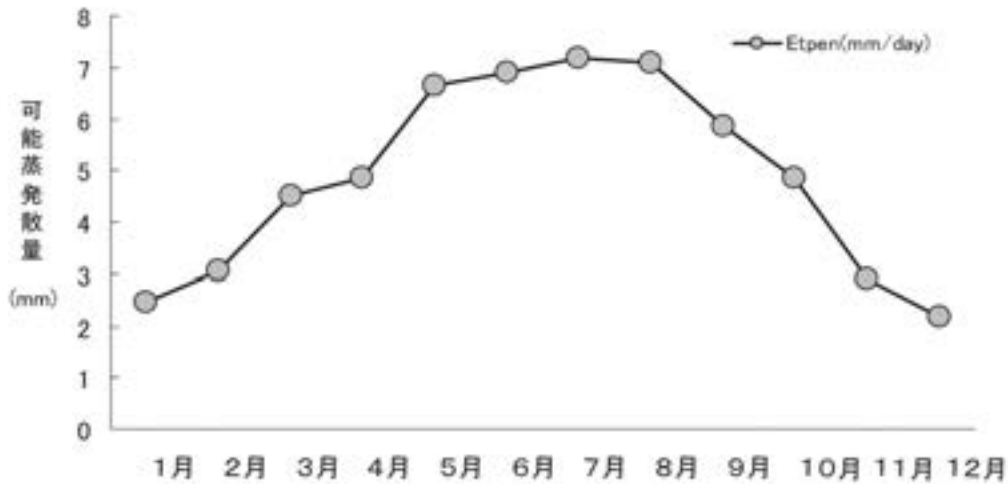


図-7. 2010年 月毎の日平均可能蒸発散量

表-1. 各月毎の日単位での可能蒸発散量 (mm/d) の比較 (アルベド: 国頭=0.2, 那覇=0.06)

月	国頭村 気象観測露場 (2010)	那覇市 三浦・諸泉 (2007)
1	2.5	2.6
2	3.0	2.9
3	4.5	3.4
4	4.8	4.1
5	6.6	4.5
6	6.9	5.3
7	7.2	6.4
8	7.1	5.9
9	5.8	5.3
10	4.9	4.2
11	2.9	3.2
12	2.2	2.7

は今後の森林管理や生物多様性における森林物理環境の指標として大きく貢献するものである。また、本法では森林露場データを

使用してペンマン法で可能蒸発散量を推定する方法について詳細に記載するとともに、一部直接測定が困難な要素については、既存研究成果を組み合わせることにより算出可能とする方法も案出している。これにより、一般的な露場観測要素からペンマン式を活用した推定が可能となっている。今回の結果では、沖縄県北部森林地域の可能蒸発散量は11月から2月にかけて冬期に低くなり、5月から9月にかけて夏期に高くなることが分かった。この傾向は、三浦・諸泉 (2007) の報告と整合的であった。

引用文献

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: 102 - 104.
 紙井泰典ほか (2001) 高知大研究報 56: 81 - 94.
 三浦健志・諸泉利嗣 (2007) 農土学会講演要旨 846 - 847.
 三浦健志・奥野林太郎 (1993) 農土論集 164: 157 - 163.
 清水貴範ほか (2011) 九州森林研究 64: 108 - 109.
 (2012年11月4日受付; 2013年3月5日受理)