

## 林分構造を示すデータに基づいた蒸発散量推定モデルの開発

玉井幸治<sup>1</sup>

1 森林総合研究所

**要旨**：森林群落からの蒸発散量を、林分構造を示す立木密度、樹高、LAI と気象データから予測するモデルを開発した。茨城県北部に位置する常陸太田試験地（常緑針葉樹林）と小川群落保護林（落葉広葉樹林）で観測された年降水量から年流出量を差し引いた検証値を用いて、モデル計算値を検証した。検証値は計算値をほぼ全てにおいて上回った。検証値には蒸発散量のほかに地下水として流域から流出する成分も含まれていることを考慮すると、常緑針葉樹林においては計算値による蒸発散量の推定は概ね妥当であると判断した。落葉広葉樹林においては計算値が過少である可能性があり、今後の課題である。

**キーワード**：立木密度、樹高、LAI、Penman-Monteith 式、常緑針葉樹林、落葉広葉樹林

### Development of evapotranspiration estimation model based on data showing forest structure.

Koji TAMAI<sup>1</sup>

1. Forestry and Forest Products Research Institute

**Abstract**: A model was developed to estimate evapotranspiration from forest communities with parameters showing forest structure, such as tree density, tree height, LAI and weather data. The calculated rate was verified with verification value obtained by “precipitation minus runoff” in Hitachi Ota Experimental watershed (Evergreen coniferous forest) and Ogawa Forest Reserve (Deciduous broad-leaved forest) located in northern part of Ibaraki Prefecture. The verification values were above the calculated values in almost cases. It was judged that the model calculation of the evapotranspiration is roughly reasonable for the evergreen coniferous forest in considering that the verification value includes the evapotranspiration as well as the components flowing out of the basin as groundwater. However, for the deciduous broad-leaved forest, the model calculation has the possibility to underestimate the evapotranspiration. This remains as a future research.

**Key-word**: Tree density, Tree height, LAI, Penman-Monteith equation, Evergreen coniferous and Deciduous broad-leaved forests.

#### I はじめに

日本の人工林の多くは伐採適齢期にあるが、伐採量が少ないため材積量と蒸発散量が多くなり、渇水期を中心とした水資源量の減少の原因になっているとも言われている（例えば 13）。水資源量を増加させるためには、間伐などにより材積量と蒸散量を減少させることが有効であるが、どの程度の間伐を行えばどの程度の水資源量増加が見込まれるのかを、事前に予測できる技術が望まれる。

日本には強い乾季が存在しないことから、水資源量評価を目的とした蒸発散量の評価モデル開発が行われている。森林微気象データから森林群落からの蒸発散量を推定するためにいろいろな方法が使用されているが、その多くは、立木密度、樹高や LAI といった林分情報を直接には使用していない。そのため森林構造を示すデータか

ら蒸発散量を評価することができない。

Penman-Monteith 式 (9) では、森林群落と大気間における水蒸気移動特性を粗度長と地面修正高などから求められる空力コンダクタンスによって、気孔開閉の度合いを群落コンダクタンスによって、それぞれ表している。立木密度、樹高と粗度長、地面修正高との関係、群落コンダクタンスが LAI と比例する関係式、立木密度と遮断蒸発量の関係式など既往の知見を結合して、森林管理による蒸発散量の変動を予測するために、立木密度、樹高、LAI を入力パラメータとする蒸発散量評価モデルを開発することを本研究では目的とする。

#### II モデルの構築

蒸発散量 (E) は、(1) 式に示す Penman-Monteith 式 (9) によって計算する。

$$IE = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho C_p \delta q g_a}{\Delta + \gamma(1 + g_a / g_c)} \quad (1)$$

ここで $R_n$ は純放射量,  $G$ は地中熱流量,  $l$ は蒸発潜熱,  $g_c$ は群落コンダクタンス,  $g_a$ は空力コンダクタンス,  $\rho$ は大気密度,  $\delta q$ は飽差,  $C_p$ は大気の低圧比熱,  $\Delta$ は飽和水蒸気圧曲線の気温における傾き,  $\gamma$ は乾湿系定数である。 $g_a$ は大気の中立状態下で成立する(2)式によって算出される。

$$g_a = \frac{\kappa^2 u(z)}{\left( \ln \frac{z-d}{z_0} \right)^2} = C_H u(z) \quad (2)$$

ここで $z$ は風速の測定高,  $u(z)$ は風速,  $\kappa$ はカルマン定数で0.4とした。

(10)が報告した, 立木密度(dense; n ha<sup>-1</sup>), 樹高(m)と $d$ (m),  $z_0$ (m)の関係を示す図から以下の近似式を得た。

$$d = (0.2327 \ln(\text{dens}) - 1.1859)h \quad (3)$$

$$z_0 = (0.2007 \exp(-0.0003 * \text{dens} - 0.0001))h \quad (4)$$

(3), (4)式の相関係数はそれぞれ0.86, 0.87であった。 $g_c$ は(15)による(5)式で求めた。

$$g_c = \alpha LAI f(S) f(\delta q) f(T) f(\delta \theta) \quad (5)$$

ここで $LAI$ は葉面積指数(m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>),  $S$ は日射量(Wm<sup>-2</sup>),  $T$ は気温(°C),  $\delta \theta$ は飽和土壌水分量と土壌水分量の差,  $f$ はそれぞれの環境変数に対する関数形,  $\alpha$ は定数であり,  $g_c$ の単位mm s<sup>-1</sup>に対して $\alpha=1.8$ とした。

$f(S)$ ,  $f(\delta q)$ ,  $f(T)$ には, (5)による(6)~(8)式を用いた。 $\delta q$ の単位はhPaである。

$$f(S) = \frac{1180S}{1000 + 180S} \quad (6)$$

$$f(\delta q) = \frac{EXP(-0.569 \delta q)}{EXP(-0.569)} \quad (7)$$

$$f(T) = \frac{39(T - 5)}{25(T + 9)} \quad (8)$$

日本には強い乾季は存在せず土壌乾燥による蒸散抑制は通常は発生しないので $f(\delta \theta)$ の値は1に固定した。

(16)は, 立木密度と遮断蒸発量の関係を観測値に対して近似した(6)式を提案している。そこで遮断蒸発量 $E_i$ (mm)は(6)式により算出する。

$$E_i = 8.6 \times 0.026 \text{dens} / (8.6 + 0.026 \text{dens}) \quad (6)$$

以上をまとめると, モデル計算に必要なデータは, 気象データとして降水量, 純放射量, 地中熱流量, 日射量, 気温, 飽差, 風速であり, 森林の状態を示すデータとして, 立木密度, 樹高,  $LAI$ である。枝打ちと間伐などの効果を評価できるように, 立木密度と $LAI$ は, それぞれ個別に値を設定できるようにしている。しかし一般的な森林では立木密度と $LAI$ には強い相関がある。そこで(2)に収録されている立木密度4000本ha<sup>-1</sup>以下のスギ林の立木密度と $LAI$ から近似した(7)式を用いて立木密度から $LAI$ を推定した。相関係数は0.78であった。

$$LAI = 1.47 \ln(\text{dens}) - 5.8492 \quad (7)$$

モデルによる蒸発散量の計算は日単位で行った。降水量が観測されなかった日は(1)式によって蒸発散量を, 降水量が観測された日は(7)式によって遮断蒸発量を計算した。また日単位では地中熱流量の値は純放射量に比べて非常に小さいので, 0kw m<sup>-2</sup>で一定とした。

(7)式はスギ林を対象に求めたものである。落葉広葉樹林である小川群落保護林への適用の妥当性も含めて, 本研究では検証を行う。

### III モデルの検証方法

モデルの検証は, 茨城県北部に位置する常陸太田試験地と小川群落保護林を対象に行った。

1. 検証対象の水資源賦存量データ 各流域において観測された降水量から流出量を差し引くことによって蒸発散量を求め, 検証値とした。

(3)は流域面積15.7haである常陸太田試験地における1981~1984年の降水量と流出量を報告している。

(6)は常陸太田試験地のうち流域面積0.88haであるHV流域における2006~2012年の降水量と流出量を報告している。(1)は流域面積58.4haである小川群落保護林内の流域における2001~2004年の降水量と流出量を報告している。これらの報告のうち, 常陸太田試験地HV流域では2009年に間伐が行われて立木密度などの林況が大きく変化したため, 2009年のデータは除外した。

2. モデルに入力する林況データ  $LAI$ は(7)式で算出するため, 立木密度, 樹高がモデルに入力する林況データである(表-1)。HV流域も含め, 常陸太田試験地はスギとヒノキを主とする人工林である。HV流域では2009年に間伐が行われている。2006~2008年, 2010~2011年の立木密度と樹高のデータには(6)の記載を

表-1. モデルに入力するにおける林況データの概要  
Table1 Forest condition data for model calculation.

試験地名	森林タイプ	年	立木密度 (本 ha <sup>-1</sup> )	樹高(m)
小川群落保護林	落葉広葉樹林	2001-2004	864	25
常陸太田試験地	スギ・ヒノキ林	1981-1984	530	24
常陸太田試験地 HV流域	スギ・ヒノキ林	2006-2008	2,229	11.1
		2010-2011	1,132	13.3

用いた。1981~1984年については(3)には林齢(1983年で59年生)しか示されていなかったため、(14)での林齢60年主林木のうち地位2の中での値を用いた。小川群落保護林は落葉広葉樹林であり、(7)、(8)の図表からそれぞれ立木密度と樹高を読み取った。LAIの値には、着葉期(6~11月)には(7)式による近似式による計算値、落葉期(12~5月)には0.0m<sup>2</sup>m<sup>-2</sup>とした。

**3. モデルに入力する気象データ** モデルに入力する気象データは、日射量、純放射量、降水量、気温、飽差、風速である。常陸太田試験地と小川群落保護林を挟んで南北に位置する気象庁の観測拠点である小名浜特別地域気象観測所と水戸地方気象台における観測値を用いて、それぞれ計算を行った。この2つは、水資源不遜量データのある試験地に最寄り日射と湿度に関する観測データのある観測拠点である。

両観測拠点で観測されている日射に関するデータは日照時間である。そのため(4)による手法で日射量を推定し、さらに(11)による手法で純放射量を推定した。

**IV 結果と考察**

表-2に検証値と計算値を降水量と合わせて年間値で示す。1例を除いた全てにおいて、検証値が計算値を上回った。その差は最大で440mm程度であった。降水量に対する差の割合は、小川群落保護林で11~25%、常陸太田試験地HV流域で6~41%、常陸太田試験地で-4~11%と年による変動は大きかった。割合の平均値は、小川群落保護林、常陸太田試験地HV流域、常陸太田試験地でそれぞれ、17%、18%、4%であった(表-3)。

厳密には、検証値には蒸発散量の他に、地下水の形態で流域外へ流出する成分も含まれる。そのため、全体的に検証値が計算値を上回る結果となった可能性がある。すなわち検証量から計算値を差し引いた値が、地下水の形態での流域外への流出量として妥当であれば、本報告によるモデル計算値は、蒸発散量として妥当である。

(12)は、水と塩化物イオンの収支から、流域面積

表-2. モデルによる計算値と観測による検証値の比較  
Table2 Comparison between calculated and observed evapotranspiration rates.

試験地名	年	降水量①	蒸発散量(mm)		値の差④ ②-③	差の割合(%) ④/①
			検証値②	計算値③		
小川群落 保護林	2001	1873.5	721.7	519.6	202.1	11%
				454.0	267.7	14%
	2002	1815.0	714.4	432.6	281.8	16%
				486.9	227.5	13%
	2003	1603.8	637.0	340.1	296.9	19%
			341.5	295.5	18%	
2004	1738.0	846.8	404.8	442.0	25%	
			460.3	386.5	22%	
常陸太田 試験地 HV流域	2006	2020	1049	639	410	20%
				623	426	21%
	2007	1571	897	696	201	13%
				808	89	6%
	2008	1499	1217	597	620	41%
				679	538	36%
	2010	1783	962	613	349	20%
				741	221	12%
	2011	1500	691	535	156	10%
				608	83	6%
常陸太田 試験地	1981	1354	579.6	495.1	84.5	6%
				434.7	144.9	11%
	1982	1604	605.6	509.4	96.2	6%
				468.3	137.3	9%
	1983	1348	465.4	411.8	53.6	4%
			437.8	27.6	2%	
1984	803.5	613.7	457.0	7.1	1%	
			498.1	-34.0	-4%	

計算値の上段は小名浜、下段は水戸における気象データによる年間での値

5.99haである桐生水文試験地本流域と0.68haである同試験地マツ沢流域における基岩以下への地下浸透量の降水量に対する割合をそれぞれ、4%、19%と報告している(表-3)。本報告においての常陸太田試験地での割合は、桐生水文試験地本流域の割合と同程度であった。また小川群落保護林と常陸太田試験地HV流域の割合は、マツ沢流域の割合と同程度であった。小さい流域からの地下浸透水は、より大きな流域で湧出して表層水に戻る(12)ことも多い。そのため流域面積の大きな流域ほど、降水量に対する地下浸透量の割合は小さくなるであろう。常陸太田試験地HV流域は桐生水文試験地マツ沢流域と流域面積、割合ともに同程度である。常陸太田試験地は桐生水文試験地本流域の約3倍の面積ではあるものの割合は同程度である。これら2流域における検証値と計算値の差は、地下水浸透によると考えても妥当な値である。それに対し小川群落保護林は桐生水文試験地本流域の約10倍の流域面積であるにもかかわらず割合は約4倍もある。桐生水文流域が風化カコウ岩を基岩とする(12)のに対し、小川群落保護林の地質は白亜紀の変成岩が主体であるので地下浸透量が多いことが考えられる。一方、落葉広葉樹林である小川群落保護林では蒸発散量計算値が過小であることも考えられる。

表-3. 検証値と計算値の差（小川，常陸太田），地下浸透量推定値（桐生）の降水量に対する割合

Table3 Percentages of observed minus observed evapotranspiration rates in Ogawa and Hitachi Ohta and estimated ground water discharge rate in Kiryu on precipitation.

試験地名	流域面積 (ha)	割合 (%)
小川群落保護林	58.4	17
常陸太田試験地	15.7	4
常陸太田試験地 HV流域	0.88	18
桐生水文試験地 本流域*	5.99	4
桐生水文試験地 マツ沢流域*	0.68	19

\*：桐生水文試験地については（12）による。

## V まとめ

立木密度と樹高から蒸発散量を推定するモデルを開発した。モデルによる計算値を，スギ・ヒノキ林である常陸太田試験地と落葉広葉樹林である小川群落保護林における降水量から流出量を差し引いた値で検証した結果，ほぼすべての事例において，検証値が計算値を上回った。地下水流出量を検討した結果，本研究で開発したモデルは，常陸太田試験地のスギ・ヒノキ林蒸発散量を妥当に推定できるが，小川群落保護林の落葉広葉樹林の蒸発散量の推定に対しては過小である可能性が認められた。

今後，モデルの改善とともに，スギ・ヒノキ林も含めて，検証例を増やす必要がある。

本研究は森林総合研究所運営費交付金プロジェクト（課題番号：201502）による助成を受けた。

## 引用文献

- (1) 阿部俊夫・藤枝基久・壁谷直記・久保田多余子・野口宏典・清水晃・坪山良夫・野口正二 (2011) 小川群落保護林における水文観測報告 (2000年8月～2007年9月). 森林総合研究所研究報告 10(4) : 291-317.
- (2) Cannell, M.G.R. (1982) World Forest Biomass and Primary Protection Data. ACADEMIC PRESS pp.391.
- (3) 藤枝基久・野口正二・小川真由美 (1996) 森林流域における土地被覆変化が水文環境に与える影響—皆伐・トラクタ集材を例にして—. 日本林学会誌 78(1) :

43-49.

(4) 紙井泰典・富士本武志・近森邦英 (2001) 日射量の気候学的推定について. 高知大学学術研究報告 50 : 81-94.

(5) Komatsu, H. (2004) A general method of parameterizing the big-leaf model to predict the dry-canopy evaporation rate of individual coniferous forest stands. *Hydrological Processes* 89 : 346-359.

(6) 久保田多余子・坪山良夫・延廣竜彦・澤野真治 (2013) 常陸太田試験地における間伐による蒸発散量の変化. 日本森林学会誌 95 : 37-41.

(7) Masaki, T., Suzuki, W., Niyama, K., Iida, S., Tanaka, N., Nakashizuka, T. (1992) Community structure of a species-rich temperate forest, Ogawa Forest Reserve, central Japan. *Vegetatio* 98 : 97-111.

(8) 正木隆・中静透・新山馨・田中浩・飯田滋生 (2017) 小川試験地における 29 樹種の胸高直径—樹高関係. 森林総合研究所研究報告 16(2) : 121-142.

(9) Monteith, J. L. (1965) Evapotranspiration and environment. *The state and movement of water in living organs*, ed. Fogg, G. E., Soc. Exp. Biol. Symp. 19 : 205-224.

(10) Nakai, T., Sumida, A., Daikoku, K., Matsumoto, K., van der Molen, M. K., Kodama, Y., Kononov, A. V., Maximov, T. C., Dolman, A. J., Yabuki, H., Hara, T., Ohta, T. (2008) Parameterisation of aerodynamic roughness over boreal, cool- and warm-temperate forests. *Agricultural and forest meteorology* 148 : 1916-1925.

(11) 中山敬一・羽生寿郎・今久 (1983) 日射量による純放射量の推定. 農業気象 38(4) : 415-418.

(12) 西本聡志・勝山正則・伊藤雅之・高橋遥・谷誠 (2008) 花崗岩森林流域における基岩以下への地下水浸透量の推定. 第119回日本森林学会大会講演要旨集 P2f12.

(13) 太田猛彦 (2012) 森林飽和. NHK出版 pp254.

(14) 林野庁・林業試験場 (1955) 北関東・阿武隈地方すぎ林分収穫表調整説明書. 収穫表調整業務研究資料 14 : pp63.

(15) Stewart, J. B. (1988) Modelling surface conductance of pine forest, *Agr. Forest Meteorol.* 43 : 19-35.

(16) Teklehaimanot, Z., Jarvis, P. G., Ledger, D. C. (1991) Rainfall interception and boundary layer conductance in relation to tree spacing. *Journal of Hydrology* 123 : 261-278.