

## 間伐・皆伐による水資源賦存量の変動予測

玉井幸治<sup>1</sup>

1 森林総合研究所

**要旨**：林分構造を示す立木密度、樹高などから森林流域の水資源賦存量を予測するモデルを開発し、スギ・ヒノキ林における植栽木の間伐・皆伐による水資源賦存量の変動量を計算した。茨城県北部に位置する常陸太田試験地（スギ・ヒノキ林）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。立木密度 2,229 本 ha<sup>-1</sup>である常陸太田試験地 HV 流域を想定して、植栽木の 10~100%を伐採した場合の水資源賦存量の変動を計算した。その際、小名浜特別地域気象観測所と水戸地方気象台にて観測されたのべ 54 年分の気象データを用いた。降水量に占める水資源賦存量の割合は、伐採前には約 40%であったが、皆伐後には約 55%にまで増加した。伐採率の増加に伴って降水量に占める水資源賦存量の割合は、全体的には増加する傾向となった。

**キーワード**：立木密度、樹高、蒸散量、遮断蒸発量、林床面蒸発量

### Change evaluation of available water resources due to thinning and clear cutting

Koji TAMAI<sup>1</sup>

Forestry and Forest Products Research Institute 1

**Abstract**: A amount of changes of available water resources due to thinning and clear cutting was evaluated with the model developed to estimate the available water resources from forest condition data such as stem density, tree height and relative solar radiation ratio and weather data. The model was improved to modify the canopy interception process and to add the process to estimate the evaporation from forest floor. The model was verified with the observed water balance observed in North Ibaraki pref. With the improvement of the model, the error between the verification value and the calculated value was judged to reduce. Assuming the forested watershed with a stem density of 2,229 number ha<sup>-1</sup>, the amount of changes of available water resources was evaluated when 10 – 100% stems were felled. At that time, a total of 54 years of observed meteorological data was used. The ratio of available water resources to total precipitation was calculated to be around 40% before felling, but it increased to around 55% after clear cutting.

**Key-word**: Stem density, Tree height, Transpiration, Canopy interception, Evaporation from forest floor.

#### 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減少の原因になっているとも言われている(例えば 7)。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という考えもあるが、そのためには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ことが望まれる。

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、立木密度や樹高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。

玉井(9)は、Penman-Monteith 式(5)において、森林群落と大気間における水蒸気移動特性を示すパラメータである粗度長と地面修正高を立木密度、樹高から推定するなどの既往の知見を結合して、森林構造を示すデータから蒸発散量を評価するモデルを開発した。

本研究では、このモデルの遮断蒸発を求める部分に改良を行い、さらに林床面蒸発量も新たに計算に加えることにより精度の向上を試みた。また茨城県北部に位置する常陸太田試験地を対象に、改良したモデルを検証し、伐採率の違いによる水資源賦存量の変動を予測した。

## II モデルの概要

水資源賦存量 (WR) は (1) 式により, 降水量 (P) と蒸発散量 (E) の差として求める。

$$WR = P - E \quad (1)$$

一方, 森林流域の水収支は (2) 式のように表される。

$$P = Q + E + \Delta S \quad (2)$$

ここで, Q は流出量,  $\Delta S$  は流域内での貯留変化量である。  $\Delta S$  が他の項に比べて十分に少ない場合には, E は P から Q を差し引いた値で近似することができる。

E は, 蒸散量 ( $E_t$ ), 遮断蒸発量 ( $E_i$ ), 林床面蒸発量 ( $E_f$ ) によって (3) 式のように構成される。

$$E = E_t + E_i + E_f \quad (3)$$

そこで (9) が Penman-Monteith 式 (5) を基本に, 気象データとして降水量, 純放射量, 地中熱流量, 日射量 ( $S$ ;  $\text{kJ m}^{-2}$ ), 気温, 飽差, 風速, 森林の状態を示すデータとして立木密度 (Dense;  $\text{本 ha}^{-1}$ ), 樹高から  $E_t$  を求めるように開発したモデルを本研究でも用いた。

一方本研究では  $E_i$  (mm) を求める方法を, (9) によるものから (3) の提案による (4) 式に変更した。

$$E_i = 0.308P\{1 - \exp(-0.000880 \text{ Dense})\} \quad (4)$$

$E_f$  は落葉層からの蒸発 ( $E_l$ ) と落葉層に被覆された土壌層からの蒸発 ( $E_s$ ) の合計値であり, (11) で開発されたモデルを用いて計算する。そのモデルでは  $E_l$  (mm) と  $E_s$  (mm) をそれぞれ (10) と (11) に示されている (5) 式と (6) 式によって求めている。

$$E_l = (1.02 \times 10^{-6} \theta - 1.3 \times 10^{-7}) a S \quad (\theta < 1.8 \text{ g g}^{-1} \text{ の時}) \quad (5)$$

$$= 1.7 \times 10^{-6} a S \quad (1.8 \text{ g g}^{-1} \leq \theta \text{ の時})$$

$$E_s = 1.2 \times 10^{-6} a S \quad (6)$$

ここで  $\theta$  は落葉層の含水比 ( $\text{g g}^{-1}$ ),  $a$  は相対日射率 (%) である。  $\theta$  の値は, 直前の計算単位時間での  $E_l$  の計算過程にて算出される (10)。  $a$  の値は, (10) と (11) で報告されている  $a$  と Dense の値による近似式から求めた。

## III モデルに入力するデータ

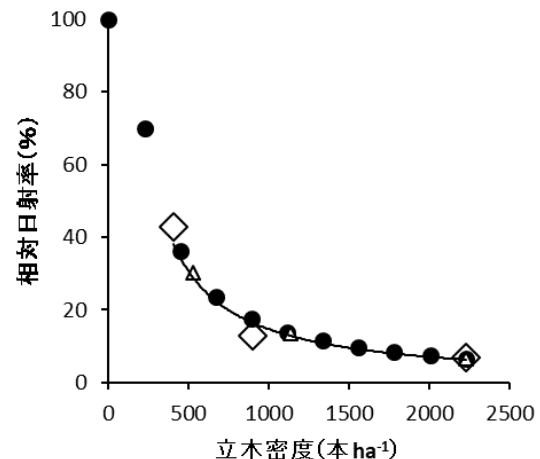
モデルにより算出された E の検証と, 間伐や皆伐によ

る WR の変動予測は, 茨城県北部に位置する常陸太田試験地を対象に行った。

1. 相対日射率の値 玉井ら (11) では, 秋田県のスギ林の間伐後, 再間伐後の Dense と  $a$  をそれぞれ,  $900 \text{ 本 ha}^{-1}$ , 13% と  $407 \text{ 本 ha}^{-1}$ , 43% と報告している。また (10) では林冠が閉鎖した状態での林分における  $a$  を 7% と報告している。これら 3 つの値 (図-1 中の  $\diamond$ ) の近似式として図-1 中に実線で示される (7) 式を得た。相関係数は 0.9759 であった。

$$a = 21960 \text{ Dense}^{-1.058} \quad (7)$$

Dense が  $407 \text{ 本 ha}^{-1}$  以上の場合では, (7) 式による  $a$  の値を用いた。 Dense が  $407 \text{ 本 ha}^{-1}$  以下の場合では, Dense と  $a$  がそれぞれ  $407 \text{ 本 ha}^{-1}$ , 43% と  $0 \text{ 本 ha}^{-1}$ , 100% の 2 点を直線で結んだ線上に位置する値とした。



$\diamond$ : (10), (11) による値, 実線: (7) 式

$\triangle$ : モデル検証に用いた値

●: 伐採による影響予測に用いた値

図-1. 計算に用いた相対日射率

Fig.1 Relative solar radiation ratio.

2. モデル検証のための水収支データ 各流域において観測された P から Q を差し引くことによって E の近似値を求め, 検証値とした。

藤枝ら (1) は流域面積  $15.7 \text{ ha}$  である常陸太田試験地の 1981~1984 年の降水量と流出量を報告している。久保田ら (4) は常陸太田試験地内の源頭部の一つである HV 流域 (面積  $0.88 \text{ ha}$ ) における 2006~2011 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。

**3. モデル検証のために入力する林況データ** 表-1 に、モデル検証のために入力する林況データを示す。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。2006～2008 年、2010～2011 年の Dense と樹高のデータには(4)の記載を用いた。1981～1984 年については(1)には林齢 (1983 年で 59 年生) しか示されていないため、(8)での林齢 60 年主林木のうち地位 2 の中での値を用いた。a の値は、図-1 で△によって示される値を用いた。

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	年	立木密度 (本 ha <sup>-1</sup> )	樹高 (m)	相対 日射率(%)
常陸太田試験地	1981-1984	530	24	30.3
常陸太田試験地 HV流域	2006-2008	2,229	11.1	6.7
	2010-2011	1,132	13.3	13.6

**4. モデル検証のために入力する気象データ** モデルに入力する気象データは、S, 純放射量, 降水量, 気温, 飽差, 風速である。常陸太田試験地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該当する期間の観測値を用いて、それぞれ計算を行った。この2つは常陸太田試験地に最寄りの、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(9)と同様に、(2)による手法で S を推定し、さらに(6)による手法で純放射量を推定した。

**5. 伐採による影響予測のために入力する林況と気象のデータ** 2009 年に行われた間伐前の常陸太田試験地 HV 流域の森林を対象に、植栽木の 10～100%を伐採した場合を想定して、水資源賦存量の変動を予測する。久保田ら(4)によると伐採前の平均樹高と立木密度はそれぞれ 11.1m, 2,229 本 ha<sup>-1</sup>であったが、間伐後でも平均樹高は変わらず、Dense は伐採率に応じて変化することにした。a の値には図-1 に●で示される値を用いた。水資源賦存量は、降水量の多寡に応じて年々変動が大きい。そのため多様な気象パターンによって影響を予測することが望ましい。そこで本研究では小名浜特別地域気象観測所における 1988～2011 年と水戸地方気象台における 1988～2017 年の計 54 年分のデータを用いて、年間の水

資源賦存量を計算した。

**IV 結果と考察**

**1. モデルの検証** モデルの検証結果を表-2 に示す。改良前のモデルによる差の割合の範囲は-4～24%、負値はわずか 1 例のみ(9)と、正值に偏っている傾向が認められた。それに対して本研究では、林床面蒸発量の計算を新たに加えたことにより、差の割合の範囲は-15～15%、正值 9 例、負値 8 例とほぼ均衡した。本研究によるモデルの改良によって(9)の計算値で見られた検証値に比べての過少傾向の改善が認められた。

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	蒸発量(mm)		値の差④ ②-③	差の割合(%) ④/①	玉井(9)に よる差の 割合	
		降水量①	検証値②				計算値③
常陸太田 試験地 HV流域	2006	2018	1045	834	211	10%	20%
				790	255	13%	21%
	2007	1570	898	853	45	3%	13%
				952	-54	-3%	6%
	2008	1498	960	733	227	15%	24%
				807	153	10%	19%
2010	1781	960	727	233	13%	19%	
			850	110	6%	12%	
2011	1499	690	639	51	3%	10%	
			714	-24	-2%	5%	
常陸太田 試験地	1981	1354.0	579.6	652.6	-73.0	-5%	6%
				568.9	10.7	1%	11%
	1982	1604.0	605.6	661.4	-55.8	-3%	6%
				605.6	0.0	0%	9%
	1983	1348.5	465.4	557.8	-92.4	-7%	4%
575.1				-109.7	-8%	2%	
1984	803.5	464.1	580.4	-116.3	-14%	1%	
			586.3	-122.2	-15%	-4%	

計算値③より右側の上段は小名浜、

下段は水戸における気象データによる年間での値  
玉井(9)による差の割合は、(9)での誤りを修正し記載

**2. 伐採による変動予測** 伐採率の違いによる蒸散量、遮断蒸発量、林床面蒸発量の変化を、54 年分の計算値の平均によって図-2 に示す。伐採率の増加に伴い、蒸散量と遮断蒸発量は減少し、林床面蒸発量は増加する計算結果となった。伐採率による蒸散量、遮断蒸発量、林床面蒸発量と水資源賦存量の内訳の変化を図-3 に示す。降水量に対する水資源賦存量の割合は、間伐前では約 40%、皆伐後では約 55%であった。大まかには伐採率の増加に伴い水資源賦存量の割合も増加した。

細かくみると、水資源賦存量の占める割合は、伐採率 70%において極大値を、90%において極小値を示した。しかしその割合の差はわずかに 2.2%でしかなかった。a の値は林床面蒸発量の計算値を大きく変動させる因子であるにもかかわらず、(7)式を求めるのに本研究で用いたデータは3つだけであった。そのため本研究の計算結

果で現れた 2.2%の差による極大値と極小値は、今後のデータ蓄積により (7) 式が更新された場合には生じない可能性がある。今後の課題としたい。

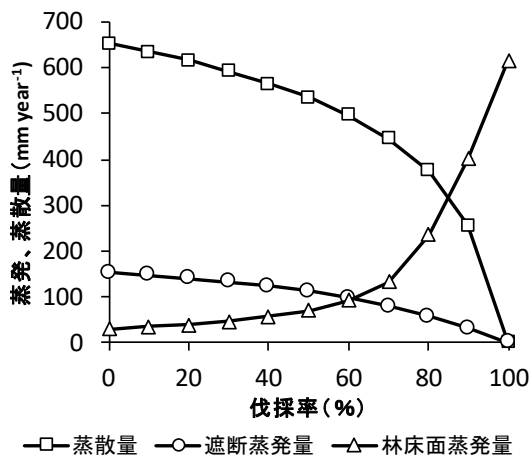


図-2. 伐採率の違いによる蒸発散量の変動  
Fig. 2 Changes of evapotranspiration due to logging ratio.

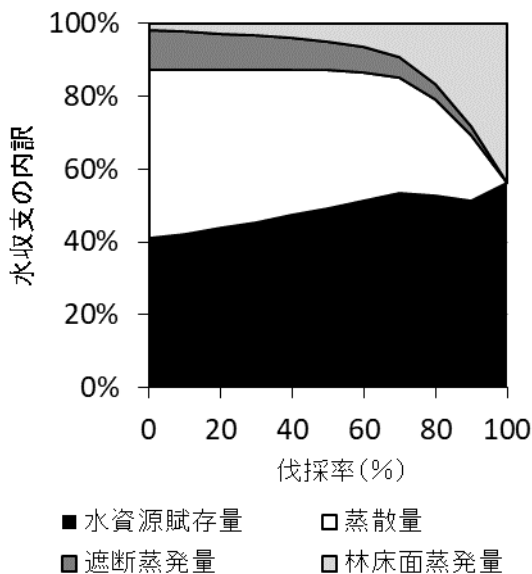


図-3. 伐採率の違いによる水収支の変動  
Fig. 3 Changes of water budget due to logging ratio.

## V まとめ

本研究で開発した、立木密度、樹高といった森林構造を示すデータと気象データから水資源賦存量を計算するモデルは一部に精度向上の課題を残すものの、その基本構造は伐採率の違いによる水資源賦存量の変動予測に活用できることが示された。水循環基本計画では、流域内

のステークホルダーが水循環に関する様々な情報を共有し、流域内での水資源を管理することを謳っている。今後、森林保有者による樹木の伐採が水流出に及ぼす影響予測について情報を求められるようになることが予測される。そのような場合に、本研究によるモデルが今後の精度向上により有効な手段となりうるであろう。

**謝辞:** 本研究は環境省地球環境保全等試験研究費 (農1942) による助成を受けた。

## 引用文献

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) Komatsu, H., Shinohara, Y. and Otsuki, K. (2015) Models to predict changes in annual runoff with thinning and clearcutting of Japanese cedar and cypress plantations in Japan, *HYDROLOGICAL PROCESSES* 29: 5120-5134.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 太田猛彦 (2012) 森林飽和。NHK出版 pp254.
- (8) 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.
- (9) 玉井幸治 (2018) 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。関東森林研究 70: 93-96.
- (10) 玉井幸治・吉藤奈津子・高橋正義・勝島隆史・後藤義明 (2018) 林床可燃物含水状態の推定モデルによる森林火災発生危険日出現日数の算出。水利科学 365: 84-98.
- (11) 玉井幸治・吉藤奈津子・飯田真一・勝島隆史・荒木誠・金子智紀・野口正二 (2019) 秋田県大館市のスギ林における間伐による林床面蒸発量のモデルによる変動評価。関東森林研究 71: 141-144.