

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

玉井幸治*¹・吉藤奈津子¹・飯田真一¹・勝島隆史¹・荒木誠¹・金子智紀²・野口正二¹

1 森林総合研究所

2 秋田県林業研究研修センター

要旨：秋田県大館市のスギ林で実施された間伐を対象として、モデルによる林床面蒸発量の変動を評価した。相対日射率は間伐前後で13%から43%へと約3.3倍に増加した。全天日射量に相対日射率を乗じて変換した間伐前後での林床面日射量と降水量をモデルに入力して林床面蒸発量を計算した。また必要なモデルパラメータはマイクロライシメーターを用いた林床面蒸発量観測値によって決定した。観測値の林床が積雪で覆われた日がほとんどないと考えられる6~11月の6ヶ月間の林床面蒸発量を比較した。1980~2018年の39年分の気象データによって計算された林床面蒸発量の平均値は、間伐前後の状態それぞれ73.4mm, 191.8mmであり、間伐により約2.6倍に増加した。既往の報告値も含めて比較したところ、降水量よりも林床面日射量の方が林床面蒸発量に及ぼす影響が大きかった。

キーワード：相対日射率、落葉層、土壌層

Evaluation of thinning effect on evaporation from forest floor in a Cedar forest in Odate, Akita

Koji TAMAI*¹, Natsuko YOSHIFUJI¹, Shin'ichi IIDA¹, Makoto ARAKI¹, Tomonori KANEKO², Shoji NOGUCHI¹

1. Forestry and Forest Products Research Institute

2. Institute of Forestry, Akita Prefecture Agriculture, Forestry and Fisheries Research Center

Abstract: Effects of thinning effect on evaporation from the forest floor was evaluated in a cedar forest in Odate City, Akita Prefecture. The relative solar radiation rate increased by about 3.3 times from 13% to 43% before and after thinning. The evaporation rate from the forest floor was calculated with the model using the data of precipitation and solar radiation on forest floor, which was converted by multiplying the global solar radiation and the relative solar radiation rate before and after thinning. A model parameter was determined based on the observations of evaporation from the forest floor using a micro lysimeter. The calculated evaporation rate from the forest floor was compared during the six months from June to November, when the forest floor was expected not to be covered with snow. The average evaporation rate from the forest floor calculated using the meteorological data for 39 years from 1980 to 2018 were 73.4 mm and 191.8 mm, respectively, before and after thinning, and increased about 2.6 times after thinning. When compared with the dependency of the evaporation rate on precipitation and solar radiation including the precipitation, Solar radiation on forest floor is estimated to have larger influence on evaporation from forest floor than precipitation.

Key-word: Relative solar radiation rate, Litter layer, Soil layer.

I はじめに

林床面蒸発は森林群落における主要な水移動素過程の一つである。しかし長期間にわたっての林床面蒸発量を評価した例は、(4)や(5)による年間量など極めて少ない。その理由としては、観測が困難であることに加え、林冠が閉鎖した森林では林床面蒸発量が少ないと思われることがある。

近年、林業の活性化や森林の多面的機能の発揮をめざして、人工林での皆伐や間伐の実施例が増えている。皆伐や間伐は森林群落内における水移動素過程それぞれに

影響を与える。例えば間伐により林床面日射量が増えると、林床面蒸発量も増えると考えられる。これらの水移動素過程の変動は、水流出量に影響を及ぼすと考えられる。しかしその影響を定量的に評価するためには、皆伐や間伐による個々の水移動素過程への影響をも評価することが必要である。

本研究の第1の目的は、秋田県大館市のスギ林で実施された間伐を対象に、間伐前後での林床面蒸発量の変動をモデルによって評価することである。(5)の提案したモデルは、土壌中の水分や熱移動を計算するルーチンを

用いている。間伐が林床面蒸発に及ぼす影響をより普遍的に評価するためには、より簡便なモデルでより多くの年間気象データを用いて計算を行うことが望ましい。そこで本研究では、(5)によるモデルをより簡便にしたものを用いる。

II 試験地

本研究は、秋田県大館市長坂地内の長坂試験地（北緯40度16分、東経140度24分）のスギ林で2017年1～2月に実施された間伐を対象にした。土壌は適潤性褐色森林土（B_d）で、地表にはスギの落葉が2～3cm、場所によっては10cm程度堆積していた。間伐によって立木密度は900本ha⁻¹（2）から407本ha⁻¹（7）へと減少した。この林分内の北向き斜面の尾根部から谷部の間に4ヶ所の観測プロットを設定した。2017年1～2月に実施された間伐は、この林分にとっては2007年1～2月に実施された間伐に次ぐ、2回目の間伐であった。

気象露場の溢水式雨雪量計（B-071, 横河電子機器製）と放射4成分計（CNR4, Kipp&Zonen製）による降水量と全天日射量の観測値を使用した。全天日射量は30秒間隔でサンプリングしたものを10分平均値として記録した。

III 林床面蒸発量の観測法

4ヶ所のプロットに林床面日射量を測定する日射センサー（S-LIB-M003, Onset社製）を1台設置し、データロガー（H21-002, Onset社製）にて10秒ごとに測定した値を1時間平均で記録した。林床面蒸発量の測定法は、玉井・服部（1994）に準じた。すなわち断面積78.5cm²、高さ13cmの塩ビ筒に落葉層ごと土壌を非攪乱で採取してマイクロライシメーターとし、電子天秤で1時間毎の重量減少量を現場で測定して、林床面蒸発量を測定した。電子天秤で読み取れる0.01gは、林床面蒸発量の約0.0013mmに相当する。4ヶ所のプロットに3個ずつマイクロライシメーターを設置し、3個の平均値をプロットにおける林床面蒸発量とした。林床面蒸発量の観測は、2016年8月～2018年11月の間に、1～2日間の観測期間で断続的に行った。マイクロライシメーターは、観測期間の始まりに底を取り付け、終わりに土壌を充填した状態で底をはずして林地に設置したままとした。観測期間中には0.5mmを超える降水は無かった。

IV 林床面蒸発モデルによる変動評価法

1. 影響評価のための気象データ 林床面蒸発量は気象環境の年々変動の影響を受けると考えられる。そのた

め間伐による影響をより普遍的に評価するためには、より多くの気象データからモデルによって林床面蒸発量を評価する必要がある。そこで評価に用いる気象データには、NCAR（米国大気研究センター）が配布する領域気象モデル WRF（Weather Research and Forecasting model）v3.9を用いて日本全国の全天日射量と降水量を3.7kmメッシュで計算した値（6）のうち、長坂試験地を含むメッシュの1980～2018年の39年間の値を、長坂において生じうる39パターンの年間気象データとして用いた。時間解像度は1時間である。

2. 林床面蒸発モデルの概要 林床面蒸発量を評価するモデルには、落葉層と土壌層から蒸発量をそれぞれ計算する（5）が提案したモデルのうち、土壌層からの蒸発量をより簡便にしたものを用いた。

（5）での土壌層からの蒸発量（ E_{soil} ; mm）の計算は、（1）に基づいて（1）、（2）式を用いている。

$$E_{soil} = 0.3 E_p \frac{(H_s - H_a)}{(100 - H_a)} \quad (1)$$

$$H_s = \exp\left(\frac{M_w \psi}{RT}\right) \times 100 \quad (2)$$

ここで E_p は可能蒸発量（mm）、 H_s 、 H_a はそれぞれ表面土壌の気相と土壌表面での大気の相対湿度（%）、 M_w は水1モルの質量（kg mol⁻¹）、 ψ は土壌表面付近の水ポテンシャル（J kg⁻¹）、 R は気体定数（J mol⁻¹°C⁻¹）、 T は絶対温度で表した地温（K）

H_s を算出するために必要な T と ψ は、それぞれ Fick の法則と Richards の方程式を基礎式とした差分法によって得られており、計算過程が複雑である。これは、表層土壌の乾燥による蒸発抑制を評価するためである。

その一方で落葉層に被覆された森林土壌では（1）が対象とした裸地面の表層土壌ほどには、地温が高くない。そして（3）はマサの表層土壌が ψ で 2,700 J kg⁻¹（pF_{3.4} に相当）よりも湿潤で T が 35°C 以下の範囲では、 H_s は 99.98% 以上と算出されることを示した。また（5）は（1）式で E_p を林床面日射量（ S ; MJ m⁻²）から推定した。以上から（1）式は、（3）式のように要約できる。

$$E_{soil} \cong 0.3 E_p = \alpha S \quad (3)$$

そこで本研究では、 E_{soil} をより簡便に求める(3)式を用い、比例定数である α （mm MJ⁻¹m²）を林床面蒸発量の観測結果から同定することにした。

このモデルで林床面蒸発を計算するのに必要な気象データは、降水量と林床面日射量である。落葉層からの蒸発量の計算は、（5）と同じである。

V 結果と考察

1. 褐色森林土壌の表層における H_s の値の確認 本

研究において、(3)式が成立することを確認するために、(2)式に適潤性褐色森林土が非常に乾燥した状態の ϕ と T として、それぞれ -98J kg^{-1} と 50°C を代入した。その場合でも、 H_s は約99.99%であった。 -98J kg^{-1} は -98kPa (pF3.0)に相当する。落葉層に被覆された森林土壌が、この数値よりも乾燥したり高温になることは考えにくい。したがって本研究ではほぼ常時、(3)式は成立すると判断できる。

2. 林床面蒸発量と林内日射率 観測によって得られた林床面蒸発量データ数は、間伐前で10、間伐後は126と大きく異なった。そのため単純に比較することは困難であるが、間伐前と間伐後の平均蒸発量と標準偏差は、 $0.018\text{mm h}^{-1} \pm 0.015\text{mm h}^{-1}$ 、 $0.024\text{mm h}^{-1} \pm 0.016\text{mm h}^{-1}$ であった。

気象露場における全天日射量と4ヶ所のプロットにおける林床面日射量の月値を用いて、2016年8月～2018年11月の各プロットにおける相対日射率を求めた(図-1)。2017年2～3月に実施された間伐による相対日射率の増加が、全てのプロットで明瞭に認められた。間伐前後における相対日射率の平均は、それぞれ13%と43%であった。間伐により相対日射率は約3.3倍となった。

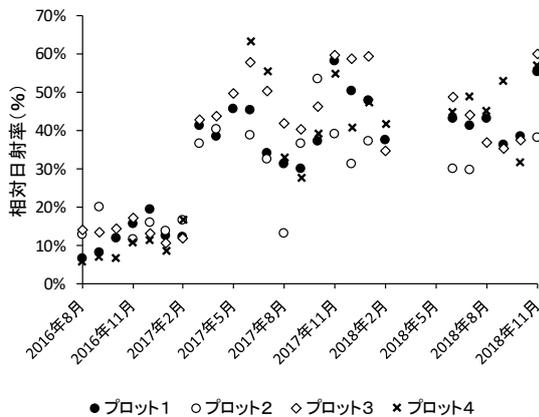


図-1. 相対日射率の変動

Fig.1 Fluctuations of relative solar radiation ratio.

3. 林床面蒸発モデルのパラメータ決定 露場における降水量データと各プロットにおける林床面日射量の観測データから各プロットにおける林床面蒸発量を計算し、林床面蒸発量の観測値との比較を行った。(3)式における α を $0.12\text{mm MJ}^{-1}\text{m}^2$ とした時の計算値との比較を図-2に示す。間伐前後の全ての観測値と計算値を対象に、原点を通る直線近似式(図-2の中の破線)を求めたところ、傾きは0.9964、相関係数は0.46であった。ばらつきは非常に大きいと言わざるを得なかった。これは、林床面日射量センサーとマイクロライシメーターの位置におけ

る林床面日射量の空間変動のばらつきに起因すると考えられる。観測を行った1時間単位では、林床面日射量に大きな空間変動が生じており、マイクロライシメーターの位置における林床面日射量を正確に測定できず、そのため計算値と観測値の間にばらつきが多くなったと考えられる。しかし近似式の周辺に多くの点が紡錘状にプロットされていることから、日単位よりも長い単位であれば、林床面日射量の空間的なバラツキがならされて平均的な値となり、林床面蒸発量も平均的な値を示すと考える。また $\alpha=0.12\text{mm MJ}^{-1}\text{m}^2$ とした場合には近似直線の傾きがほぼ1であるので、図-2に示した観測値と計算値の総計はほぼ等しくなる。つまり長期間での総量を正確に評価できると考える。そこで α の値を $0.12\text{mm MJ}^{-1}\text{m}^2$ として、林床面蒸発量の間伐による林床面蒸発量への影響評価に本モデルを用いる。

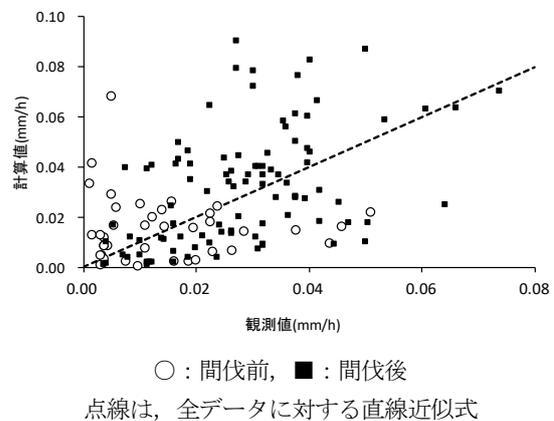


図-2. 林床面蒸発量の観測値と計算値の比較 ($\alpha=0.12\text{mm MJ}^{-1}\text{m}^2$ の場合)

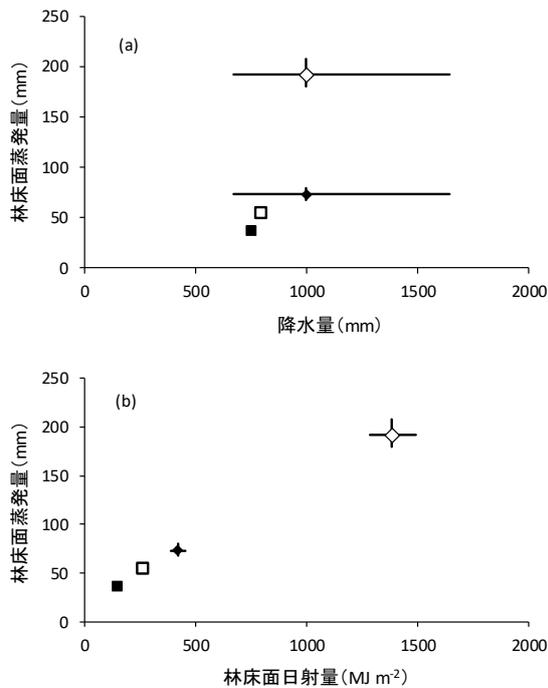
Fig.2 Comparison between observed and calculated evaporation rate from the forest floor. (In case that $\alpha = 0.12\text{mm MJ}^{-1}\text{m}^2$)

4. 林床面蒸発量の変動評価 図-1に示したように間伐前後での相対日射率の平均値はそれぞれ13%と43%であった。そのためIV-1で説明した全天日射量データに13%と43%を乗じて、それぞれ間伐前後の状態における林床面日射量に変換し、間伐前後それぞれの状態における39個の林床面蒸発量の年間値を計算した。但し、林床が積雪に被覆されている状態では林床面蒸発は生じない。そのため長坂試験地において林床が積雪に被覆されている日が頻発すると考えられる12月から翌年5月までは除外し、6～11月の間の林床面蒸発量を集計した。各年の林床面蒸発量の平均値と標準偏差はそれぞれ間伐前で $73.4\text{mm y}^{-1} \pm 2.7\text{mm y}^{-1}$ 、間伐後で $191.8\text{mm y}^{-1} \pm 6.4\text{mm y}^{-1}$ であった。間伐により林床面蒸発量は2.6倍

となった。

5. 林床面蒸発量に影響を及ぼす環境因子 本研究における結果と、日本における既往報告である(5)による京都府木津川市の山城試験地(落葉広葉樹二次林)と、(4)による京都市左京区銀閣寺試験地(落葉・常緑広葉樹の混交林)と比較した。既往報告の値は、本研究に合わせて6~11月の期間での値を示す。

降水量と林床面蒸発量の関係を図-3(a)に示す。長坂の値を示す点の上下左右についている線は、1980~2018年の気象変動パターンによる値の、最大値と最小値の範囲を示している。降水量が同程度であっても、林床面蒸発量を示す点は試験地ごとに異なった領域に分布している。それに対し林床面日射量と林床面蒸発量の間では、試験地間において正の相関が明瞭に認められる(図-3(b))。このことは、林床面日射量が林床面蒸発量に強い影響を及ぼしていることを示している。



□：山城試験地，■：銀閣寺試験地，◆：長坂試験地（間伐前），◇：長坂試験地（間伐後）
長坂試験地の値を示す点周囲の線は、最大値と最小値の範囲を示す。

図-3. 6~11月の林床面蒸発量と降水量(a), 林床面日射量(b)の比較

Fig.3 Comparison between evaporation rate from the forest floor and precipitation (a) and solar radiation on the forest floor (b) (June – November).

長坂(間伐前)が、山城よりも林床面日射量と林床面蒸発量が多いのは、林分の構成樹種の違いと、長坂(間伐

前)でも既に2007年に間伐を1回行っていることが影響していると考えられる。

VI まとめ

スギ林において実施された間伐により、林床面日射量は約3.3倍に増加したことが観測され、林床面蒸発量は約2.6倍に増加したと見積もられた。既往報告による値と比較したところ、降水量よりも林床面日射量が林床面蒸発量に強い影響を及ぼしていることが認められた。

本研究で用いたモデルは、表層土壌の気相中の湿度が約100%であることを前提としている。日本の森林土壌では大概妥当な前提であるが、林床面日射量がもっと多くかつ落葉層が薄い場合や数か月に及ぶ乾季のある地域に適用する場合には、この前提条件の確認が必要である。

本研究は環境省による地球環境保全等試験研究費(農1942)により実施された。

引用文献

- (1) Campbell, G. S. (1985) Soil physics with basic. Transport models for Soil-Plant Systems., Elsevier Science Publishers; 中野政詩・東山 勇監訳(1987) パソコンで学ぶ土の物理学, 192pp, 鹿島出版会, 東京.
- (2) 金子智紀・野口正二・和田覚・新田響平・澤野真治(2019) 間伐を実施したスギ林における冬期樹冠通過降水量の評価. 水文・水資源学会誌 32 : 138-147.
- (3) 玉井幸治(1997) 関西地域における落葉広葉樹二次林の蒸発散特性に関する研究. 京都大学農学部博士論文 96pp.
- (4) Tamai, K., Abe, T., Ito, H., Araki, M. (1998) Radiation budget, soil heat flux and latent heat flux at the forest floor in warm, temperate mixed forest. *Hydrological Processes* 12 : 2105-2114.
- (5) 玉井幸治・服部重昭(1994) 落葉広葉樹林における林床面蒸発のモデル化と流域への適用. 日本林学会誌 76 : 233-241.
- (6) 玉井幸治・吉藤奈津子・高橋正義・勝島隆史・後藤義明(2019) 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.
- (7) 田村浩喜・新田響平・和田覚・金子智紀(2019) スギ人工林における2018/2019積雪期および2019春期の樹冠通過降水量. 第24回東北森林科学大会 : 41.