

日本の針葉樹人工林における立木密度と遮断率の関係

小松 光^{*1}

小松 光：日本の針葉樹人工林における立木密度と遮断率の関係 日林誌 89:217~220, 2007 筆者は、日本の針葉樹人工林における遮断蒸発研究の12の計測例をまとめ、立木密度と遮断率の間に正の相関を見出した。その相関を回帰することで、遮断率 [%] = $0.00498 \times (\text{立木密度 [本 ha}^{-1}\text{)]) + 12.0$ ($R^2 = 0.43$) なる関係式を得た。立木密度以外、降水量・樹高・樹種との関係についても検討したが、これらと遮断率の間に明確な関係は認められなかった。したがって、上式は、立木密度とそれに伴う葉面積指数の変化が樹冠付着水分量を変化させることを通して、遮断蒸発量に与える影響を表現しているものと思われた。この式は、日本の針葉樹人工林の遮断蒸発量が、成長段階や森林管理によってどのように変化するかを考える基礎となる。

キーワード：遮断蒸発、蒸発散、人工林、針葉樹、森林管理、立木密度

Komatsu, H.: Relationship between Stem Density and Interception Ratio for Coniferous Plantation Forests in Japan. J. Jpn. For. Soc. 89: 217 ~ 220, 2007 Summarizing 12 studies examining interception evaporation from coniferous plantation forests in Japan, we found a positive correlation between stem density and interception ratio. Regressing the correlation, we obtained the following equation: interception ratio [%] = $0.00498 \times (\text{stem density [stems ha}^{-1}\text{)]) + 12.0$ ($R^2 = 0.43$). We also examined relationships of interception ratio with annual rainfall, canopy height, and tree species, and found no clear relationships between them. This fact suggests the equation represents the effect of stem density (and leaf area index which varies with stem density) on interception evaporation amounts through changing water storage capacity of the canopy. The equation will be useful for considering change in interception evaporation amounts with forest growth and management.

Key words: conifer, evapotranspiration, forest management, interception evaporation, plantation, stem density

I. はじめに

森林水文学において、森林の特性（立木密度、樹高、葉量など）と蒸発散量の関係を明らかにするのは重要なテーマの一つである（小松, 2007）。こうした関係が明らかになれば、任意の森林における蒸発散量を、観測せずに推定することができるようになる。

同時に、こうした関係が明らかになると、森林管理が森林水循環をどのように変化させるかも予想できるようになり、水資源管理などにおける森林管理の有効性を議論する基礎が築かれることになる。このような議論の基礎が築かれることは、わが国で管理されなくなった針葉樹人工林が増加しているなどの現状（たとえば、藤森, 2000）から考えて、望ましいことと思われる。

森林蒸発散はおもに蒸散と遮断蒸発からなるが、蒸散についてはすでに Komatsu (2003, 2004, 2005) などにおいて詳細な検討がなされ、任意の森林における蒸散量を精度よく推定することができるようになりつつある（小松・堀田, 2005；小松ら, 2005）。

その一方で、遮断蒸発についてはいくつかレビュー研究があるものの（たとえば、Ward and Robinson, 2000；Ding-

man, 2001）、任意の森林における遮断蒸発量を精度よく推定するには至っていない。

筆者は、遮断蒸発量の推定の基礎として、手始めに日本の針葉樹人工林における遮断蒸発研究の結果をまとめたところ、立木密度と遮断率の間に関係を発見したので、ここに報告する。

II. 方 法

筆者は、日本の針葉樹人工林における遮断蒸発研究を収集し、立木密度と遮断率の間の関係を調べた。データ収集の際、一年以上の計測に基づいているもののみを対象とし、一年未満の計測に基づいているもの（たとえば、細田ら, 1990；真田ら, 1991）は除外した。1カ月から数カ月程度の短期計測によって得られる遮断率は1年以上の長期計測によって得られる遮断率と異なることがある（たとえば、服部ら, 1982；Cape *et al.*, 1991）からである。また、冬季に雨ではなく雪が降ることの多い地域のデータ（たとえば、村井, 1970；五名ら, 2005）も収集の際に除外している。そのような地域において決定された降水の遮断率は、やはり1年未満の計測結果に基づくことになるからである。

* 連絡・別刷請求先 (Corresponding author) E-mail: komatsu@forest.kyushu-u.ac.jp

¹ 九州大学福岡演習林 (811-2415 福岡県糟屋郡篠栗町津波黒 394)

Kasuya Research Forest, Kyushu University, 394 Tsubakuro, Sasaguri-machi, Kasuya-gun, Fukuoka 811-2415, Japan. (2006年10月16日受付；2007年2月7日受理)

III. 結 果

表-1に収集されたデータを示した。得られたサンプル数は12であり、ヒノキ林のものが5サンプル、スギ林のものが3サンプル、スギ・ヒノキ混交林のものが1サンプル、アカマツ林のものが3サンプルであった。

図-1aは立木密度と遮断率の関係を示している。ばらつきは大きいものの、立木密度が大きいときに遮断率が大きい傾向が認められた。図中の回帰直線は最小二乗法によって決定され、その式形は、

$$\text{遮断率}[\%] = 0.00498 \times (\text{立木密度} [\text{本 ha}^{-1}]) + 12.0 \quad (R^2 = 0.43) \quad (1)$$

であった。(ただし、この式は回帰のもととなったデータの

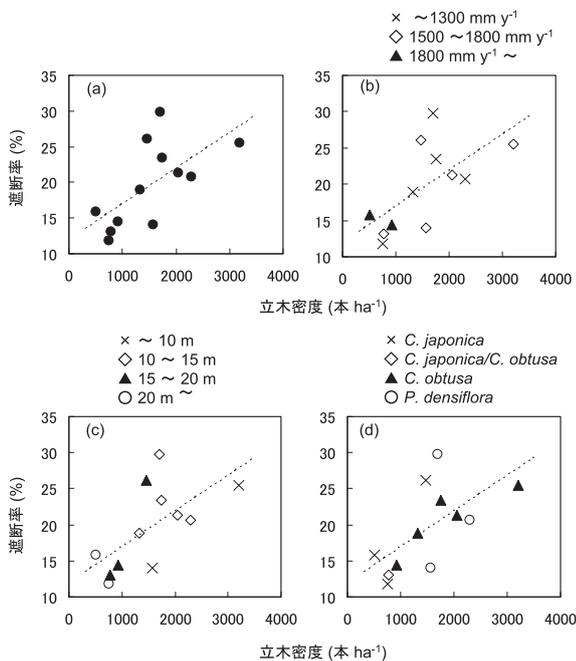


図-1. (a) 針葉樹林における立木密度と遮断率の関係

回帰直線は、遮断率 [%] = 0.00498 × (立木密度 [本 ha⁻¹]) + 12.0 で表現される。(b) 図-1aに同じ。ただし、年降水量で場合分けされている。(c) 図-1aに同じ。ただし、樹高で場合分けされている。(d) 図-1aに同じ。ただし、樹種で場合分けされている。

立木密度の範囲でのみ有効であることに注意されたい。たとえば、上式で立木密度0本 ha⁻¹を仮定すると遮断率12.0%を得るが、立木密度0本 ha⁻¹なら物理的に考えて遮断率は0%になるはずである。

日本の針葉樹人工林は、幼齢林を除けば、立木密度が大きいときに葉面積指数 (LAI) も大きく (村上, 2003), したがって樹冠付着水分量も大きいものと思われる。そして、気象条件や樹冠の空気力学的特性が一定と仮定するならば、樹冠付着水分量が大きければ遮断蒸発量も大きくなる。このような観点から、立木密度と遮断率との正の相関は理解可能である。

しかし現実には、表-1にまとめられたサンプル間で気象条件に違いがあるだろうし、樹高が立木密度と負の相関にある (図-2) ことから、樹高による樹冠の空気力学的特性の違いもサンプル間に存在する。

気象条件のうち遮断率に大きな影響を与えるものとして降水量がある。降水量以外の条件を一定と仮定するならば、遮断率は一般に降水量が大きいときに小さくなる (たとえば, Ward and Robinson, 2000)。

図-1aを年降水量で場合わけして描いたのが図-1bである。年降水量1,300 mm y⁻¹以下のプロットが回帰直線より系統的に上に位置しているということもないし、年降水量1,800 mm y⁻¹以上のプロットが回帰直線より系統的に下に位置しているということもない。このように、年降水量による遮断率の系統的な違いは認められなかった。このこ

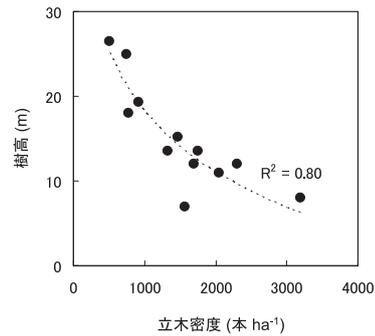


図-2. 樹高と立木密度の関係

表-1のデータに基づく。

表-1. 日本の針葉樹人工林で計測された遮断率

樹 種	立木密度 (本 ha ⁻¹)	樹高 (m)	平均胸高直径 (cm)	Projected LAI	計測期間 (month)	年間降水量 (mm y ⁻¹)	遮断率 (%)	References
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	3200	8	7.6		12	1793	25.5	岩坪・堤 (1967)
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	2051	11	16.1		12	1543	21.3	服部ら (1982)
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	1325	13.5	18.2		12	1087	18.9	服部・近嵐 (1988)
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	1750	13.5	18.2	5.7	12	1336	23.4	服部・近嵐 (1988)
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	923	19.3	34.2		30	2053	14.4	田中ら (2005a)
<i>Cryptomeria japonica</i>	1467	15.2	23.2		12	1584	26.1	佐藤ら (2003a, b)
<i>Cryptomeria japonica</i>	750	25	29		12	1150	11.8	生原・相場 (1982)
<i>Cryptomeria japonica</i>	513	26.5	38.5		41	2304	15.8	田中ら (2005a)
<i>Cryptomeria japonica/Chamaecyparis obtusa</i>	783	18	32	3.7	24	1734	13.1	Murakami et al. (2000)
<i>Pinus densiflora</i>	1575	7	12		12	1513	14.0	Mitsudera et al. (1984)
<i>Pinus densiflora</i>	2300	12	20		12	1291	20.7	Taniguchi et al. (1996)
<i>Pinus densiflora</i>	1700	12	20		12	1291	29.8	Taniguchi et al. (1996)

とは、降水量の遮断率への影響が、立木密度(とそれに伴って変化する LAI) の遮断率への影響に比べて小さかったことを示唆している。なお、気象条件のうち風速も遮断率に影響を及ぼすが、表-1 のサンプルについて風速データが得られなかったため、風速の遮断率への影響は検討できなかった。

他方、樹高については、そのほかの条件を一定と仮定するならば、遮断率は樹高が大きいときに大きくなる。樹高が大きい森林ほど空気力学的コンダクタンスが大きく、遮断蒸発速度が大きくなるからである(たとえば、Hewlett, 1982)。

図-1a を樹高で場合わけして描いたのが図-1c である。樹高 10 m 未満の二つのプロットはともに回帰直線より下に位置している。これは、樹高が小さいために空気力学的コンダクタンスも小さく、その結果として遮断蒸発速度が小さかったためかもしれない。現時点では樹高 10 m 未満のデータがわずかに二つなので、はっきりしたことはわからない。樹高 10 m 以上においては、樹高が大きいほどプロットが回帰直線より上にくるというような傾向は認められなかった。このように、樹高による遮断率の違いは明確でなかった。このことは、樹高が遮断蒸発速度を通じて遮断蒸発量へ与える影響が、立木密度(および、立木密度とともに変化する LAI) が樹冠付着水分量を通じて遮断蒸発量へ与える影響に比べて小さかったことを示唆している。

なお、樹高に加えて樹種についても同様の検討を行ってみたが、樹種による遮断率の系統的な違いは認められなかった。図-1a を樹種で場合わけして描いたのが図-1d である。特定の樹種においてプロットが回帰直線より上に(あるいは下に)位置しているという傾向は認められない。

IV. 考 察

図-1a から作成された式(1)は、日本の針葉樹人工林の成長に伴う遮断蒸発量の変化を推定するのに役立つ。日本の針葉樹人工林においては、成長段階に応じて立木密度が変化する(たとえば、渡邊, 1994)ので、立木密度を式(1)に入力することで遮断率を得ることができる。そして、その遮断率と年間降水量から年間遮断蒸発量を見積もることが可能となる。

式(1)は、針葉樹人工林の管理が森林水循環に与える影響の評価にも、示唆を与えるものである。間伐などの森林管理が行われている針葉樹人工林と森林管理が行われていない針葉樹人工林では、樹冠構造などのさまざまなファクターに違いがあるだろうが、とりわけ立木密度(および、立木密度とともに変化する LAI) に顕著な違いがあると思われる。一方、式(1)は近似的に立木密度(および、立木密度とともに変化する LAI) が遮断蒸発量へ与える影響を定式化したものと理解することができる。なぜなら、図-1b, c, d での検討結果から、立木密度(および、立木密度とともに変化する LAI) 以外のファクターが遮断蒸発量へ与える影響は、立木密度が遮断蒸発量へ与える影響に比べ

て小さいものと思われるからである。したがって、式(1)を用いることで、森林管理の有無によって遮断蒸発量がどのように異なるのか、予想することができる。一方、蒸散量(ここでは、「蒸散」という言葉を、林床面蒸発を含む dry-canopy evaporation の意味で使うことにする)については、すでに Komatsu (2005) などにおいて検討されているので、遮断蒸発量と蒸散量の和である蒸発散量が森林管理の有無によってどのように異なるのか、予想できることになる。

ここでは仮想的に、立木密度 1,000 本 ha⁻¹ の管理されている針葉樹人工林、立木密度 2,000 本 ha⁻¹ の管理されていない針葉樹人工林の年間蒸発散量を考えてみる。なお、これら二つの森林で樹高はともに等しいと仮定する。

式(1)に基づく、管理された針葉樹人工林で管理されていない針葉樹人工林より、年間遮断蒸発量は年降水量の約 5% 小さいことになる。

他方、蒸散量は以下の二つの理由から、この二つの森林で明確には異ならないと思われる。第一は、蒸散量を平衡蒸発量で割った Priestley-Taylor 定数について、LAI (projected) が 3.0 以上であれば、樹高との間に強い相関が得られるものの、LAI や立木密度との間には相関がほとんど認められないことである(Komatsu, 2005; Komatsu and Hotta, 2007)。このことは、LAI が 3.0 以上なら蒸散量が LAI や立木密度によってあまり変化しないことを示唆している。この示唆は、Raupach (1995) や Komatsu (2004) によるモデル研究によって支持される。Raupach (1995) は多層モデルの計算により、LAI に伴って蒸散(林床面蒸発を含む)の行われる位置(林冠/林床、あるいは、林冠上層/下層)は変化するものの、蒸散量の総量はほぼ変化しないことを示した。また、Komatsu (2004) は樹冠構造として LAI も立木密度も考慮せず、樹高のみを考慮したモデルによって、LAI が 3.0 以上の針葉樹林の蒸散量を精度よく再現することに成功している。第二は、日本の針葉樹人工林の多くは、村上(2003)のレビューによれば LAI (projected) が 3.0 以上であることである。

以上をまとめると、管理された針葉樹人工林で管理されていない針葉樹人工林より、年間蒸発散量は年降水量の約 5% 小さいことになる。

なお、上の説明で現れた“LAI (projected)”とは、葉が面状をしていると仮定したときの LAI のことである。LAI (projected) 以外に、実際の葉の表面積をもとに LAI を定義することもある。この場合の LAI は、LAI (total surface area) などのように記述される。広葉樹は葉が面状をしているため、広葉樹林の LAI (projected) と LAI (total surface area) は区別する必要がないが、針葉樹は葉が面状をしていないので、針葉樹林の LAI (projected) と LAI (total surface area) は区別する必要がある(たとえば、Landsberg and Gower, 1997)。

さて、上で行ったように、式(1)を使って森林管理の有無による年間蒸発散量の違いを予想することが可能であ

る。このような予想は、管理の有無の影響が立木密度と LAI のみによって表現されるという仮定に基づいていた。現実には、立木密度・LAI 以外に葉面積密度分布や根系分布も異なるだろう。そして、こうした違いが遮断蒸発量や蒸散量に影響を与える可能性も否定できない。加えて、上で行った予想では下層植生の遮断蒸発が考慮されていないことにも注意が必要である。下層植生の遮断蒸発量は一般に、林冠木の遮断蒸発量に比べてずっと小さい（たとえば、田中ら、2005b）。しかし、強度の間伐によって下層植生が著しく繁茂した場合などには、下層植生の遮断蒸発が重要となる可能性も考えられる。

したがって、上で行ったような予想の確からしさを裏付けるために、今後、流域水収支法による観測・解析を行っていく必要がある。たとえば、管理が継続的に行われている針葉樹人工林流域と管理を途中で放棄した針葉樹人工林流域において、対象流域法によって森林管理の放棄が森林水循環をどのように変化させるのか調べるのは、以上で行ったような予想を裏付ける有効な方法である。このような二流域を用意できない場合でも、管理されていた針葉樹人工林の一流域で途中から管理を放棄したり、逆に管理されていなかった針葉樹人工林に管理を加えたときの水循環の変化を流域水収支法によって調べることで、上で行ったような予想の検証を行うことができるだろう。

本研究で得られた立木密度と遮断率の関係式は、今後望まれる流域水収支からの観測・解析に先立って、森林管理の有無が蒸発散をはじめとする森林水循環にどのような違いを生み出すのかについて予想を提供し、研究の指針を与える点で意義がある。

本論で引用した遮断蒸発に関する文献の多くは、田中延亮さん（東京大学農学生命科学研究科）から紹介していただきました。図-1b のアイディアは智和正明さん（九州大学福岡演習林）にいただきました。二人の査読者の方々には、本研究の射程について冷静で建設的なコメントをいただきました。本研究を行うにあたって、科学研究費補助金 No.17380096 と No.18810023 の援助を受けました。ありがとうございました。

引用文献

Cape, J.N., Brown, A.H.F., Robertson, S.M.C., Howson, G., and Paterson, I.S. (1991) Interspecies comparisons of throughfall and stemflow at three sites in northern Britain. *For. Ecol. Manage.* 46: 165-177.

Dingman, S.L. (2001) *Physical hydrology*. 646pp, Prentice Hall, Upper Saddle River.

藤森隆郎 (2000) 森との共生. 236 pp, 丸善ライブラリー, 東京.

五名美江・北原 曜・小野 裕 (2005) 樹種・季節による樹冠遮断量の違いについて. *中森研* 52: 235-238.

生原喜久雄・相場芳憲 (1982) スギ・ヒノキ壮齡林小流域における養分の循環とその収支. *日林誌* 64: 8-14.

服部重昭・近嵐弘榮 (1988) ヒノキ林における間伐が樹冠遮断に及ぼす影響. *日林誌* 70: 529-533.

服部重昭・近嵐弘榮・竹内信治 (1982) ヒノキ林における樹冠遮断量とその微気象学的解析. *林試技報* 318: 79-102.

Hewlett, J.D. (1982) *Principles of forest hydrology*. 183 pp, The University of Georgia Press, Georgia.

細田育広・坪山良夫・志水俊夫・平和 敬 (1990) 林地土層における熱・水分環境 (I). *日林論* 101: 587-589.

岩坪五郎・堤 利夫 (1967) 森林内外の降水中の養分量について (第2報). *京大演報* 39: 110-124.

Komatsu, H. (2003) Relationship between canopy height and the reference value of surface conductance for closed coniferous stands. *Hydrol. Process.* 17: 2503-2512.

Komatsu, H. (2004) A general method of parameterizing the big-leaf model to predict the dry-canopy evaporation rate of individual coniferous forest stands. *Hydrol. Process.* 18: 3019-3036.

Komatsu, H. (2005) Forest categorization according to dry-canopy evaporation rates in a growing season: Comparison of the Priestley-Taylor coefficient values from various observation sites. *Hydrol. Process.* 19: 3873-3896.

小松 光 (2007) 森林からの蒸散を比較する. (森林水文学. 久米 篤編, 森北出版, 東京). 131-147.

小松 光・堀田紀文 (2005) 森林蒸発散フラックス計測大流行の産物. *水学会誌* 18: 613-626.

Komatsu, H. and Hotta, N. (2007) Relationship between stem density and dry-canopy evaporation rates in coniferous forests. *J. Hydrol.* 332: 271-275.

小松 光・澤野真治・久米朋宣・橋本昌司 (2005) 森林の特性と蒸発散量の関係. *日林誌* 87: 170-185.

Landsberg, J.J. and Gower, S.T. (1997) *Applications of physiological ecology to forest management*. 354 pp, Academic Press, San Diego.

Mitsudera, M., Kamata, Y., and Nakane, K. (1984) Effect of fire on water and major nutrient budgets in forest ecosystems III. Rainfall interception by forest canopy. *Jpn. J. Ecol.* 34: 15-25.

村井 宏 (1970) 森林植生による降水のしゃ断についての研究. *林試研報* 232: 25-64.

村上茂樹 (2003) 森林からの蒸発散と林幹・葉量・林分構造との関係—水源林管理への応用に向け—. *水利科学* 269: 1-28.

Murakami, S., Tsuboyama, Y., Shimizu, T., Fujieda, M., and Noguchi, S. (2000) Variation of evapotranspiration with stand age and climate in a small Japanese forested catchment. *J. Hydrol.* 227: 114-127.

Raupach, M.R. (1995) Vegetation-atmosphere interaction and surface conductance at leaf, canopy and regional scales. *Agric. For. Meteorol.* 73: 151-179.

真田 勝・太田誠一・大友玲子・真田悦子 (1991) 札幌近郊におけるトドマツ, エゾマツ人工林の樹幹流・林内雨および林外雨について. *森林立地* 33: 8-15.

佐藤嘉展・大槻恭一・小川 滋 (2003a) マテバシイ林における年間樹冠遮断量の推定. *九大演報* 83: 15-29.

佐藤嘉展・久米 篤・大槻恭一・小川 滋 (2003b) 樹冠構造の違いが樹冠通過雨の分布特性に及ぼす影響—スギ林とマテバシイ林における樹冠通過雨特性の比較—. *水学会誌* 16: 605-616.

田中延亮・蔵治光一郎・白木克繁・鈴木祐紀・鈴木雅一・太田猛彦・鈴木 誠 (2005a) 袋山沢試験流域のスギ・ヒノキ壮齡林における樹冠通過雨量, 樹幹流下量, 樹冠遮断量. *東大演報* 113: 197-240.

田中延亮・蔵治光一郎・鈴木雅一・太田猛彦・鈴木 誠 (2005b) ヒノキ壮齡林の下層樹木の樹冠下における樹冠通過雨量の空間分布特性. *東大演報* 113: 133-154.

Taniguchi, M., Tsujimura, M., and Tanaka, T. (1996) Significance of stemflow in ground-water recharge I: Evaluation of the stemflow contribution to recharge using a mass balance approach. *Hydrol. Process.* 10: 71-80.

Ward, R.C. and Robinson, M. (2000) *Principles of hydrology*. 450 pp, McGraw-Hill, London.

渡邊定元 (1994) *樹木社会学*. 450 pp, 東大出版会, 東京.