

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：27401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26292088

研究課題名(和文)水資源保全のための林分密度管理図の調製

研究課題名(英文)Development of stand density control diagram for water resources conservation

研究代表者

井上 昭夫 (Inoue, Akio)

熊本県立大学・環境共生学部・教授

研究者番号：80304202

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：水資源保全のための林分密度管理図を調製した。この密度管理図は、林分密度と平均胸高直径をもとに、蒸発散量を推定することを可能にする。

図を調整するために、以下の3つの仮定を設けた。(1)蒸発散量は蒸散量と遮断蒸発量の和として表せる、(2)蒸散量は平均樹液流速、林分密度および平均胸高直径から推定できる、(3)遮断蒸発量は、林分密度と年間降雨量をもとに、指数式によって推定できる。

調製した密度管理図は、横軸に林分密度、縦軸に蒸発散量をとったものであり、ある平均胸高直径に対する林分密度と蒸発散量との関係を示す等平均直径曲線、ならびに林分密度に応じた蒸発散量の上限を示す自己間引き曲線から構成される。

研究成果の概要(英文)：The stand density control diagram for water resources was developed, which enabled us to predict the evapotranspiration from stand density and mean diameter at breast height.

To develop the diagram, we assumed that (1) the evapotranspiration was composed of the evaporation and the rainfall interception; (2) the evaporation could be estimated from mean sap flux density, stand density and mean diameter at breast height; and (3) the rainfall interception could be predicted using an exponential equation from mean diameter at breast height and annual rainfall.

The horizontal and vertical axis of the diagram developed here showed the stand density and the evapotranspiration, respectively. The diagram also composed of (1) the equivalent diameter curve that shows the relationship between stand density and evapotranspiration of the stand with a given mean diameter and (2) the self-thinning boundary line that indicates the maximum stand density-evapotranspiration relationship.

研究分野：森林計画学

キーワード：水資源 蒸発散 蒸散 遮断蒸発 人工林 密度管理図 辺材

### 1. 研究開始当初の背景

わが国においては、国土の2/3を森林が占め、その4割が人工林であるため、水資源に及ぼす人工林の影響は相当に大きいと予想される。また、近年、針葉樹人工林は蒸発散が大きく、水資源を減少させるため、広葉樹林に転換すべきであるとか、管理放棄された針葉樹人工林は蒸発散が大きく、水資源の保全の面で好ましくないため、何らかの管理を行うべきであるといった主張がある。

これらの主張は果たして科学的にみて肯定されるのだろうか？ また、人工林をどのように管理すれば、蒸発散による損失を減らし、水資源を保全できるのだろうか？ これらの疑問に答えるためには、人工林の林分構造と蒸発散との関係を明らかにする必要があり、また、その関係を林分密度管理図のようなわかりやすい形で示すことが望ましいと考える。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、スギとヒノキの人工林を対象として、林分構造と蒸発散との関係をモデル化すること、そのモデルをもとに水資源保全のための林分密度管理図を調製することの2点にある。

### 3. 研究の方法

水資源保全のための密度管理図を調製するために、まず、蒸発散の構成要素を蒸散と遮断蒸発の2つに区分し、林床面蒸発については、密度管理の必要となる林冠閉鎖後においては無視できる程度に小さいものと仮定した。

蒸散量については、平均樹液流速と辺材面積合計との積として与えられる。そこで、平均樹液流速については、先行研究をレビューするとともに、いくつかの林分においてグラニ工法による樹液流速計測を実施した。辺材面積合計については、林分密度と辺材面積から求められる。立木状態のままで辺材面積を把握するために、熊本市内の木材市場において、樹幹直径と辺材面積とのアロメトリ関係を調べた。

一方、遮断蒸発量については、小松(2007)とKomatsu et al. (2015)によって林分密度と降雨量の関数として表現できることがわかっている。しかし、これらの研究では、用いた関数形が異なることに加え、低密度林分のデータが含まれていない。そこで、熊本県阿蘇地方のヒノキ高齡林などで遮断蒸発を複数年にわたって観測し、遮断蒸発量と林分密度との関係について再検討した。

そして、得られた知見をもとに、スギ・ヒノキ人工林を対象とし、水資源保全のための林分密度管理図を調製するとともに、その有用性と限界について検討を加えた。

### 4. 研究成果

#### (1) 蒸散量のモデリング

樹液流計測による林分蒸散量Eの推定式は、以下のように書ける。

$$E = J_s \times A_s$$

ただし、 $J_s$  は平均樹液流速、 $A_s$  は辺材面積合計である。先行研究の慎重なレビューの結果、 $J_s$  については、林分密度、樹木サイズ、斜面傾度および間伐の前後などの影響を強く受けず、Eの主要な決定要因は $A_s$ であることが示唆された。

そこで、先行研究の結果ならびに熊本市内の木材市場での調査の結果をもとに、立木状態のままで $A_s$ を推定するための樹幹直径dと辺材面積aとの関係について検討した。その結果、種の違いと関係なく、aはdの1.6乗に比例することがわかった。以上のことより、林分スケールでのEの推定モデルとして次式を得ることができた。

$$E = J_s \times N \times k \times d^{1.6}$$

ただし、Nは林分密度、kはaとdのアロメトリ式における比例定数である。

また、自己間引き林分における林分密度は、平均直径D(蔽密には断面積平均直径 $D_g$ であるが、自己間引き林分におけるDと $D_g$ との関係はアイソメトリであるため、べき指数には影響しない)の-1.6乗に比例することが古くから知られている(Reineke式)。上述したdとaとのアロメトリ式を林分レベルに拡張し、Reineke式に代入することでDを消去すると、自己間引き林分における辺材面積合計は、林分密度や樹木サイズによらず一定となる、すなわち「辺材面積の保存則」が成り立つことが予想できる。このことより、自己間引き林分における蒸散量は林分密度や樹木サイズによらず一定となっており、この値を上回らないことが示唆される。

#### (2) 遮断蒸発量のモデリング

スギとヒノキの人工林における遮断蒸発の先行研究から45個のデータを整理し、熊本県阿蘇地方のヒノキ高齡林において得た4個のデータを加え、林分密度と遮断率(遮断蒸発量の降雨量に占める割合)との関係を解析した。その結果、低密度の高齡林データを含めた場合、林分密度と遮断率との関係は、小松(2007)の用いている直線式よりも、むしろKomatsu et al. (2015)の用いている指数式の方が良く適合することがわかった。遮断率に年間降雨量を乗じることによって、年間での遮断蒸発量を得ることから、遮断蒸発量Iの推定モデルを以下のように定義した。

$$I = P \times m \{1 - \exp(-nN)\} \times 100$$

ただし、Pは年間降雨量、Nは林分密度、mとnはパラメータである。このモデルは、わが

国のさまざまな地域（ただし、降雪地域を除く）におけるスギ・ヒノキ林のデータをもとに作成されているため、その適用可能な地域は広いものとする。

### (3) 水資源保全のための林分密度管理図

以上の結果をもとに、スギ・ヒノキ人工林における水資源保全のための林分密度管理図を調製した。この密度管理図は、横軸に林分密度を、縦軸には蒸発散量をそれぞれプロットしたものであり、複数の曲線群によって構成されている。

1つ目の曲線は「等平均直径曲線」という曲線であり、ある平均胸高直径に応じた林分密度と蒸発散量との関係を示している。このため、この曲線は図中に1本ではなく、複数の曲線として描かれている。なお、この曲線群は、自己間引きを起こしていない林分における林分密度と蒸発散量との関係を示したものである点に注意を要する。

2つ目の曲線は「自己間引き曲線」である。この曲線は、自己間引き林分における林分密度と蒸発散量との関係を示したものであり、辺材面積の保存則から予想される蒸散量一定を前提としている。

この密度管理図をもとに、以下のようにして林分蒸発散量を推定できる。まず、対象林分の林分密度と平均胸高直径の情報を現地調査などの手段によって把握する。そして、得られた平均胸高直径に応じる等平均直径曲線において、当該林分の林分密度に該当するポイントを図中でみつける。このときの縦軸の値を読み取ると、この値が当該林分における年間蒸発散量の推定値となっている。この点から、間伐を行った場合には、等平均直径曲線に沿って間伐本数に応じた分だけ林分密度の低い方へとポイントをシフトさせ、縦軸の値を読み取ると、その値が間伐後における年間蒸発散量の推定値である。そして、先に求めた間伐前の蒸発散量との差分をとることで、間伐による蒸発散量の低下量、すなわち水資源の増加量を評価できる。一方、林分の成長にともなう蒸発散量を評価する場合には、林分密度を一定にした状態で、等平均直径曲線を成長した分だけ直径サイズの大きい曲線に乗り換えるようにすれば良い。そして、縦軸の値の差分を求めることによって、林分の成長による蒸発散量の増加量、すなわち水資源の減少量を定量できる。

### (4) 密度管理図の有用性と限界

最後に、調製した密度管理図の有用性と限界について議論した。この密度管理図では、蒸発散量の推定において必要なパラメータは、平均樹液流速、年間降雨量、林分密度および平均胸高直径の4つと少ない。これらのうち、平均樹液流速については一定と仮定するならば、年間降雨量については気象庁のホ

ームページ（過去の気象情報）からおおまかな値を把握できる。また、林分密度と平均胸高直径については、林分成長モデルにおける基本的な推定量であることから、現地調査による実測値でなくても、システム収穫表などによって容易に推定できる。したがって、この林分密度管理図は、森林の管理や林分の成長にともなう蒸発散量の変化を予測するための簡便な手段を提供する。

その一方で、この密度管理図を使用するにあたっては、構成要素としてのモデルの特性を注意深く考慮すべきである。例えば、平均樹液流速を一定と仮定していることや、林分密度と遮断率との関係式におけるパラッキからみて、この図を個別の林分に適用した場合、大きい誤差をともなう可能性がある。この密度管理図は、あくまで流域くらいの広域スケールで、森林の管理や林分の成長が水資源に及ぼす影響を評価するためのツールとして認識すべきだと考える。

具体的な利用例として、阿蘇地方における蒸発散量の推移に関するシミュレーションを実施した。このシミュレーションの基礎となるのは、阿蘇地方のスギ・ヒノキ人工林における齢級構成表、システム収穫表および本研究において調製した密度管理図の3つである。まず、期首における齢級構成とシステム収穫表から予測した齢級ごとの林分密度と平均胸高直径の値から、阿蘇地方全域における水資源量（降雨量と蒸発散量の差分）を予測した。次に、5年後、10年後というように、齢級構成の変化とシステム収穫表による推定値をもとに、水資源量の推移を評価した。このような評価に加え、人工林における施業（間伐）実施面積割合を加味することによって、森林の管理が水資源に及ぼす評価をより具体的に議論することも可能となる。

以上要するに、本研究において調製した水資源保全のための林分密度管理図は、森林の管理と成長が水資源に及ぼす影響を評価する上で、もっとも有効なツールの1つとなりうるものとする。今後においては、蒸散量と遮断蒸発量について、より多くの林分での事例を蓄積することにより、モデルパラメータの精緻化を図る必要がある。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計40件)

1. Inoue, A., Nagano, M. and Sankoda, K. (2017) Rainfall interception in an intensively managed low density stand of bamboo, *Phyllostachys pubescens*. Journal of Forest Research, 査読あり, Vol.22, No.1, pp.53-60 DOI: 10.1080/13416979.2016.1273086
2. Inoue, A. and Sakamoto, M. (2017)

- Comparing the methods for quantifying the culm surface area of bamboo, *Phyllostachys pubescens*. Ecological Research, 査読あり, Vol.32, No. 3, pp.445-450  
DOI: 10.1007/s11284-017-1453-4
3. Inoue, A., Tochihara, S., Sato, M. and Shima, H. (2017) Universal node distribution in three bamboo species (*Phyllostachys* spp.). Trees, 査読あり, Vol.31, in press  
DOI: 10.1007/s00468-017-1546-2
  4. Miyazawa, Y., Inoue, A., Maruyama, A., Otsuki, K. and Giambelluca, T.W. (2017) Transpiration under varying environmental conditions: comparison of modeled and measured transpiration for trees in a cool temperate forest in Mt. Aso, Japan. Ecological Research, 査読あり, Vol.32, in press  
DOI: 10.1007/s11284-017-1471-2
  5. Sato, M., Inoue, A. and Shima, H. (2017) Bamboo-inspired optimal design of functionally graded hollow cylinders. PLoS ONE, 査読あり, Vol.12, No.5, e0175029  
DOI: 10.1371/journal.pone.0175029
  6. Ito, K., Ota, T., Mizoue, N., Yoshida, S., Sakuta, K., Inoue, A., Ito, S. and Okada, H. (2017) Differences in growth responses between *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* planted in group selection openings in Kyushu, southern Japan. Journal of Forest Research, 査読あり, Vol.22, No.2, pp.126-130  
DOI: 10.1080/13416979.2017.1283978
  7. Saito, T., Kumagai, T., Tateishi, M., Kobayashi, N., Otsuki, K. and Giambelluca, T.W. (2017) Differences in seasonality and temperature-dependency of stand transpiration and canopy conductance between Japanese cypress (Hinoki) and Japanese cedar (Sugi) in a plantation. Hydrological Processes, 査読あり, Vol.31, No.10, pp.1952-1965  
DOI: 10.1002/hyp.11162
  8. Sun, H., Kasahara, T., Otsuki, K., Saito, T. and Onda, Y. (2017) Spatio-temporal streamflow in a small, steep headwater catchment in western Japan. Hydrological Science Journal, 査読あり, Vol.62, No.5, pp.818-829  
DOI: 10.1080/02626667.2016.1266635
  9. Ichihashi, R., Chiu, C.W., Komatsu, H., Kume, T., Shinohara, Y., Tateishi, M., Tsuruta, K. and Otsuki, K. (2017) Contribution of lianas to community-level canopy transpiration in a warm-temperate forest. Functional Ecology, 査読あり, Vol.31, in press  
DOI: 10.1111/1365-2435.12881
  10. Teramoto, M., Liang, N., Takagi, M., Zeng, J. and Grace, J. (2017) Sustained acceleration of soil carbon decomposition observed in a 6-year warming experiment in a warm-temperate forest in southern Japan. Scientific Report, 査読あり, Vol.2016, No.6, 35563  
DOI: 10.1038/srep35563
  11. Liang, N., Teramoto, M., Takagi, M. and Zeng, J. (2017) High-resolution data on the impact of warming on soil CO<sub>2</sub> efflux from an Asian monsoon forest. Scientific Data, 査読あり, Vol.4, 170026  
DOI: 10.1038/sdata.2017.26
  12. Shima, H., Sato, M. and Inoue, A. (2016) Self-adaptive formation of uneven node spacings in wild bamboo. Physical Review E, 査読あり, Vol.93, No.2, 022406  
DOI: 10.1103/PhysRevE.93.022406
  13. Chiu, C.W., Kume, T., Komatsu, H., Tseng, H., Wey, T.H. and Otsuki, K. (2016) Seasonal changes of azimuthal, and tree-to-tree variations in sap flux affect stand transpiration estimates in a *Cryptomeria japonica* forest, central Taiwan. Journal of Forest Research, 査読あり, Vol.21, No.4, pp.151-160  
DOI: 10.1007/s10310-016-0525-6
  14. Chiu, C.W., Komatsu, H., Katayama, A. and Otsuki, K. (2016) Scaling-up from tree to stand transpiration for a warm-temperate multi-specific broad-leaved forest with a wide variation in stem diameter. Journal of Forest Research, 査読あり, Vol.21, No.4, pp.161-169  
DOI: 10.1007/s10310-016-0532-7
  15. Katayama, A., Kume, T., Ohashi, M., Matsumoto, K., Nakagawa, M., Saito, T., Kumagai, T. and Otsuki, K. (2016) Characteristics of wood CO<sub>2</sub> efflux in a Bornean tropical rainforest. Agricultural and Forest Meteorology, 査読あり, Vol.220, pp.190-199  
DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.01.140
  16. Komatsu, H., Shinohara, Y., Kume, T., Tsuruta, K. and Otsuki, K. (2016) Does measuring azimuthal variations in sap flux lead to more reliable stand transpiration estimates? Hydrological Processes, 査読あり, Vol.30, No.13, pp.2129-2137  
DOI: 10.1002/hyp.10780

17. Kume, T., Tsuruta, K., Komatsu, H., Shinohara, Y., Katayama, A., Ide, J. and Otsuki, K. (2016) Differences in sap flux-based stand transpiration between upper and lower slope positions in a Japanese cypress plantation watershed. *Ecohydrology*, 査読あり, Vol.9, No.6, pp.1105-1116  
DOI: 10.1002/eco.1709
18. Shinohara, Y., Otani, S., Kubota, T., Otsuki, K. and Nanko, K. (2016) Effects of plant roots on the soil erosion rate under simulated rainfall with high kinetic energy. *Hydrological Science Journal*, 査読あり, Vol.61, No.13, pp. 2435-2442  
DOI: 10.1080/02626667.2015.1112904
19. Sun, X.C., Onda, Y., Otsuki, K., Kato, H. and Gomi, T. (2016) The effect of strip thinning on forest floor evaporation in a Japanese cypress plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 査読あり, Vol.216, pp. 48-57  
DOI: 10.1016/j.agrformet.2015.10.006
20. Yan, M.J., Zhang, J.G., He, Q.Y., Shi, W.Y., Otsuki, K., Yamanaka, N. and Du, S. (2016) Sapflow-based stand transpiration in a semiarid natural Oak forest on China 's Loess Plateau. *Forests*, 査読あり, Vol.7, No.10, 227  
DOI: 10.3390/f7100227
21. Inoue, A. and Nishizono, T. (2015) Conservation rule of stem surface area: a hypothesis. *European Journal of Forest Research*, 査読あり, Vol.134, No.4, pp.599-608  
DOI: 10.1007/s10342-015-0875-1
22. Kobayashi, T., Fukushima, K., Hisamoto, Y. and Inoue, A. (2015) The species biology of bamboos in Japan: from gene to landscape. *Plant Species Biology*, 査読あり, Vol.30, No.1, pp.42-44  
DOI: 10.1111/1442-1984.12075
23. Shinohara, Y., Levia, D.E., Komatsu, H., Nogata, M. and Otsuki, K. (2015) Comparative modeling of the effects of intensive thinning on canopy interception loss in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forest of western Japan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 査読あり, Vol.214-215, pp.148-156  
DOI: 10.1016/j.agrformet.2015.08.257
24. 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*, 査読あり, Vol. 29, No.24, pp.5120-5134  
DOI: 10.1002/hyp.10520
25. Tateishi, M., Xiang, Y., Saito, T., Otsuki, K. and Kasahara, T. (2015) Changes in canopy transpiration of Japanese cypress and Japanese cedar plantations because of selective thinning. *Hydrological Processes*, 査読あり, Vol.29, No.24, pp.5088-5097  
DOI: 10.1002/hyp.10700
26. Saito, T., Yamamoto, K., Komatsu, M., Matsuda, H., Yunohara, S., Komatsu, H., Tateishi, M., Xiang, Y., Otsuki, K. and Kumagai, T. (2015) Using airborne LiDAR to determine total sapwood area for estimating stand transpiration in plantations. *Hydrological Processes*, 査読あり, Vol.29, No.24, pp.5071-5087  
DOI: 10.1002/hyp.10482
27. Zhang, J.G., He, Q.Y., Shi, W.Y., Otsuki, K., Yamanaka, N. and Du, S. (2015) Radial variations in xylem sap flow and their effect on whole-tree water use estimates. *Hydrological Processes*, 査読あり, Vol.29, No.24, pp.4993-5002  
DOI: 10.1002/hyp.10465
28. Chiwa, M., Saito, T., Haga, H., Kato, H., Otsuki, K. and Onda, Y. (2015) A nitrogen-saturated plantation of Japanese cedar and Japanese cypress in Japan is a large non-point nitrogen source. *Journal of Environmental Quality*, 査読あり, Vol.44, No.4, pp.1225-1232  
DOI: 10.2134/jeq2014.09.0401
29. Ichihashi, R., Komatsu, H., Kume, T., Onozawa, Y., Shinohara, Y., Tsuruta, K. and Otsuki, K. (2015) Stand-scale transpiration of two Moso bamboo stands with different culm densities. *Ecohydrology*, 査読あり, Vol.8, No.3, pp.450-459  
DOI: 10.1002/eco.1515
30. Tsuruta, K., Komatsu, H., Kume, T., Shinohara, Y. and Otsuki, K. (2015) Canopy transpiration in two Japanese cypress forests with contrasting structures. *Journal of Forest Research*, 査読あり, Vol.20, No.5, pp.464-474  
DOI: 10.1007/s10310-015-0495-0
31. Shinohara, Y., Komatsu, H. and Otsuki, K. (2015) Variations in sapwood and intermediate wood thicknesses for Japanese cedar: their impacts on sapwood area estimates. *Hydrological Research Letters*, 査読あり, Vol.9, No.2, pp.35-40  
DOI: doi.org/10.3178/hrl.9.35
32. Shinohara, Y. and Otsuki, K. (2015)

Comparison of soil water content between a Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forest and a natural broadleaved forest in western Japan. *Plant Species Biology*, 査読あり, Vol.30, No.2, pp.96-103  
DOI: 10.1111/1442-1984.12076

33. Komatsu, H., Shinohara, Y., Kumagai, T., Kume, T., Tsuruta, K., Xiang, Y., Ichihashi, R., Tateishi, M., Shimizu, T., Miyazawa, Y., Nogata, M., Laplace, S., Han, T., Chiu, C.W., Ogura, A., Saito, T. and Otsuki, K. (2014) A model relating transpiration for Japanese cedar and cypress plantations with stand structure. *Forest Ecology and Management*, 査読あり, Vol.334, pp. 301-312  
DOI: 10.1016/j.foreco.2014.08.041

〔学会発表〕(計40件)

1. Nagano, M., I, F., Shima, H. and Inoue, A.: Allometric relationship between stem diameter and sapwood area. The 2016 World Congress on Advances in Civil, Environmental and Materials Research, 2016年8月30日, Jeju Island (Korea)
2. 永野美穂・井上昭夫・丸山篤志・宮沢良行・高木正博・大槻恭一: 日本の針葉樹人工林における遮断率推定モデルの再検討. 第127回日本森林学会大会, 2016年3月29日, 日本大学(神奈川県藤沢市)
3. 永野美穂・井上昭夫・宮沢良行・丸山篤志・高木正博・大槻恭一: 豪雨地域のヒノキ高齡林における遮断率の観測. 第71回九州森林学会, 2015年10月6日, ホルトホール大分(大分市)
4. 井上昭夫・宮沢良行・丸山篤志・永野美穂: 針葉樹人工林における蒸発散のシミュレーションモデルとその阿蘇地方への適用. 日本景観生態学会第25回北九州大会, 2015年6月6日, 九州工業大学(福岡県北九州市)
5. 井上昭夫・永野美穂・三小田憲史・高木正博・大槻恭一: 阿蘇地方のヒノキ人工林における遮断率の観測( )試験地の設定. 第70回九州森林学会大会, 2014年10月25日, 佐賀大学(佐賀市)

〔図書〕(計1件)

田中丸治哉・大槻恭一・近森秀高・諸泉利嗣, 朝倉書店, 地域環境水文学, 2016, 224p.

6. 研究組織

(1)研究代表者

井上 昭夫 (INOUE, Akio)  
熊本県立大学・環境共生学部・教授  
研究者番号: 80304202

(2)研究分担者

高木 正博 (TAKAGI, Masahiro)  
宮崎大学・農学部・教授  
研究者番号: 70315357

大槻 恭一 (OTSUKI, Kyoichi)  
九州大学・農学部・教授  
研究者番号: 80183763

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

三小田 憲史 (SANKODA, Kenshi)  
齋田 純子 (TSURUDA, Junko)  
永野 美穂 (NAGANO, Miho)