

19年生スギ人工林の斜面上部，中部，下部における 年蒸散量の推定

Estimation of annual canopy transpiration rates on upper,
middle, and lower plots along a slope in a manmade
19-year-old *Cryptomeria japonica* stand

丹 下 健*

Takeshi TANGE*

I はじめに

同一斜面上のスギの生長が，斜面の下部から上部にむかうにしたがって低下することはよく知られている。その原因としては，林地の水分条件や栄養条件の差が考えられる。ここでは，水分条件を検討する一段階として，林冠の蒸散による水分消費量が，斜面上の位置によって違うかどうかをしらべた。

森林の蒸散量の推定法としては，林分の蒸散量を直接求めようとする熱収支法^{2,11)}やライシメータ法¹⁾，個体または個体の一部について測定した蒸散量から林分全体の蒸散量を推定するヒートパルス法^{4,9,11)}や切枝法^{10,13)}を用いる方法などがある。

それらの方法のうち，ヒートパルス法を用いる方法は，立地条件や生育状態が一樣な林分において蒸散量を推定する場合だけでなく，たとえば地形がこきざみに変化し，それに対応して林木の生育状態も異なるような林分で，局所的な立地条件の違いによる蒸散量の違いを比較する場合などにも適する方法と考えられる。また，この方法は，それほどおおがかりな設備がいらず，交流電源のないところでも行なえる利点がある。

本研究では，斜面上の位置の違いで樹高が著しく異なる19年生スギ人工林において，ヒートパルス法による蒸散量の測定値から，林分の蒸散量を推定する方法についていろいろと検討したうえで，斜面上の異なる位置での年蒸散量の比較を行なった。

本研究は，東京大学大学院農学系研究科林学専門課程の修士論文の一部として，造林学教室で行なった。御指導いただいた真下育久教授ならびに根岸賢一郎教授に心から感謝申し上げる。

*東京大学農学部千葉演習林

University forest in Chiba, Faculty of Agriculture, University of Tokyo

本研究の準備からとりまとめまでの全般にわたり御指導いただいた松本陽介博士に厚くお礼申し上げます。貴重な測定資料を快くお貸しくださった林業試験場の森川靖博士ならびに丸山温氏、調査に御協力いただいた千葉演習林職員各位に心から感謝の意を表する。

II 調査地および方法

1 調査地および調査区

調査地は、東京大学農学部附属演習林千葉演習林清澄作業所管内の36林班 C₁₀ 小班内の林齢19年生スギ人工林（樹齢22年生，1983年現在）である。調査地の位置を図-1に示す。この調査地は、菖蒲沢試験地と名づけ、スギ人工林の成長と水分環境の関係を生態生理学的観点から明らかにする目的で，1981年6月に設定されたものである。標高約300m，海岸線から直線距離約5kmのところに位置し，地質は，新第三紀の白岩凝灰岩層（凝灰岩と泥岩の互層）である。調査地において実測した年平均気温，年降水量は，それぞれ，1982年が15.0°C，2630mm，1983年が14.6°C，2890mmである。

図-2に本調査地の地形（等高線），スギの樹高（1984年1月現在），等樹高線⁵⁾および調査区などを示す。調査地は，南，西，北の三方に尾根が走り，東向きの谷頭地形をなす。

尾根と谷部との標高差は，最大で28mである。南斜面，東斜面，北斜面の平均傾斜角度は，それぞれ，36°，41°，42°とかなり急である。土壤型は，尾根筋がB_B型，中腹部がB_{D(a)}型，谷部がB_E型であり，斜面の下部ほど湿潤な土壤になる¹⁶⁾。

スギの樹高は，尾根部では低く，谷部では高い。調査地の面積は約0.17haであるが，地形とスギの樹高の間には明らかな対応がみられる。ほとんどスギであるが，一部に37本のヒノキが混植されており，立木本数の合計は，690本（1984年1月現在）である。

調査区は，図中太実線で示す位置に設定した。Plot 1は斜面上部の区，Plot 3は斜面中部の区，Plot 5は斜面下部の区として設け，それぞれの中に補助調査区 Plot 2，Plot 4を設け

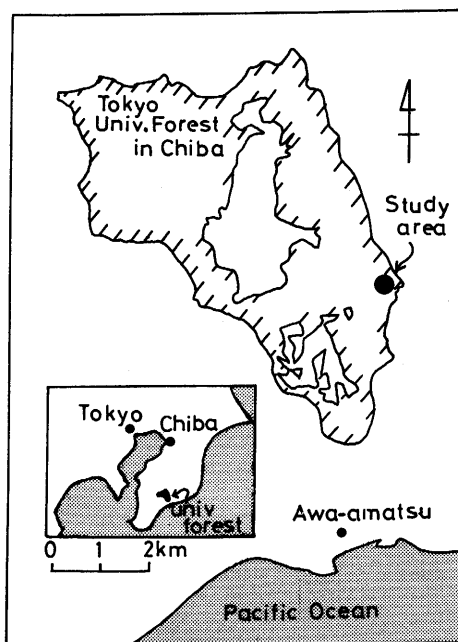


図-1 調査地の位置

Fig. 1 Study area

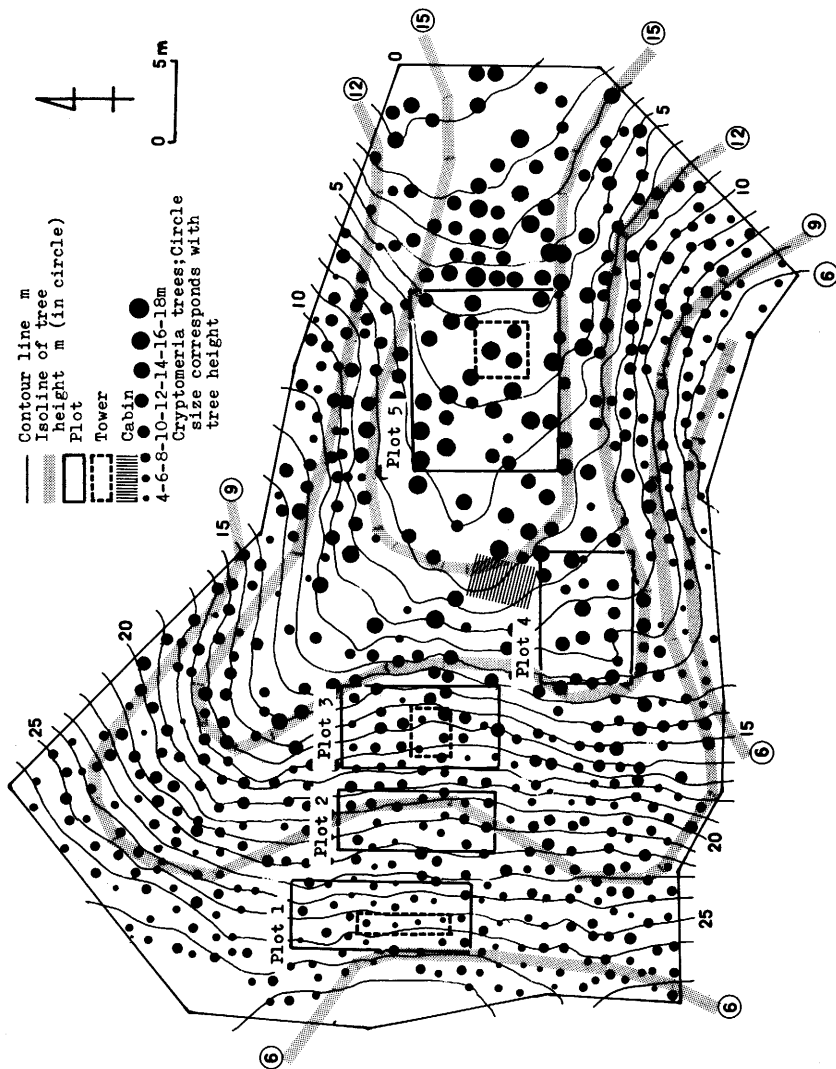


図-2 地形、樹高および調査区 (1984年1月)

Fig. 2 Topography, tree height, and plots in the study area (Jan., 1984)

た。今回の報告には、補助調査区は用いなかった。また、Plot 1, 3 および 5 の点線は、数本のスギを枝張り部分もふくめ内側にいれた鉄パイプ製足場の位置を示す。

各調査区の立木密度、平均樹高、平均胸高直径などを表-1 に示す。各調査区の樹冠投影図を図-3 に示す。表-1 のように、Plot 1 と Plot 3 は、平均樹高がそれぞれ6.9, 8.9m で個体の大きさは異なるが、立木密度は5200, 4900本・ha⁻¹とほぼ等しい。しかし、Plot 5 は、10年生のとき除伐が行なわれたために、立木密度が2500本・ha⁻¹で Plot 1 や Plot 3 のほぼ半分である。

1983年および1984年の各調査区の年樹高生長量は、表-1 に示すとおりそれぞれ、Plot 1 が55.7, 48.3cm, Plot 3 が56.6, 49.0cm, Plot 5 が52.0, 55.3cmである。したがって、最近の樹

表-1 調査区概要 (1984年1月)

Table 1 Outline of the plots (Jan., 1984)

調査区 Plot	立木密度 Density no. ha ⁻¹	平均樹高 Mean H m	平均胸高直径 Mean DBH cm	平均生枝下高 Mean HB m	平均生枝下高直径 Mean DB cm	平均年樹高生長量 Mean height growth cm·yr ⁻¹	
						in 1983	in 1984
Plot 1	5200	6.9	8.5	2.1	7.8	55.7	48.3
Plot 3	4900	8.9	9.2	3.7	7.8	56.6	49.0
Plot 5	2500	15.1	16.7	9.3	10.4	52.0	55.3

H: Height, DBH: Diameter at breast height, HB: Crown height, DB: Diameter at crown height

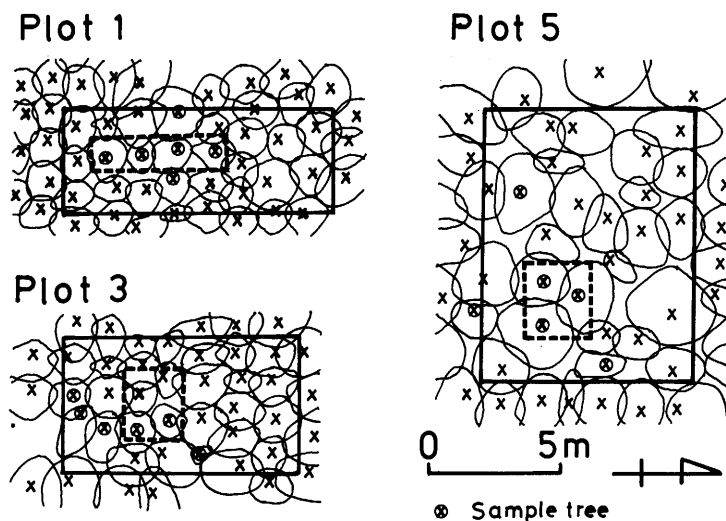


図-3 樹冠投影図 (1983年9月)

Fig. 3 Crown projection in each plot (Sep., 1983)

高生長速度には、樹高差ほどの調査区間差はない。

2 測定項目および方法

1) 樹液流速速度の日変化の測定

ヒートパルス法^{6,8)}により、樹幹内の樹液流速速度の日変化を調べた。測定は、生枝下高の位置の樹皮下約1cmの深さの幹木部で行なった。ここで、測定位置を生枝下高としたのは、蒸散に対する樹液流速速度の変化の時間的な遅れが小さいこと、蒸散作用の場である樹冠と測定部位との相対的な位置関係を、大きさの異なる個体間でも似たものにするなど理由による。

測定は、1983年2月から12月にかけて、毎月2～10日間行ない、全期間で48日間行なった。それぞれの日の測定は、日の出1～2時間前から、日の入り数時間後の測定可能な下限値に近い樹液流速速度(2～3 cm・hr⁻¹)になるまで、約1時間の間隔で行なった。また、通水組織のやにづまり等の影響を軽減するために、センサーは1～2か月おきにうめかえた。

供試木の本数は、2～8月は、各調査区で3本ずつ、9～12月は、各調査区で6本ずつである。供試木は、いろいろな大きさの木が含まれるように選木した。各調査区における供試木の位置を図-3に、樹高、胸高直径、生枝下高、生枝下高直径、生枝下高(測定部位)の樹液通導部面積(辺材部面積)を表-2に示す。

ヒートパルスの移動速度から樹液流速速度を次式でもとめた。

$$Sv = a \cdot V$$

ただし、Sv: 樹液流速速度 (cm・hr⁻¹)

V: ヒートパルスの移動速度 (cm・hr⁻¹)

a: 係数

係数aは、先に、井上⁴⁾がスギでもとめた1.39をもちいた。

2) 日樹液流量の算出

樹液流速速度と樹液流量の関係は、次式によって表わされる。

$$Sf = Sa \cdot Sv$$

ただし、Sf=樹液流量 (cm³・tree⁻¹・hr⁻¹)

Sa=測定部位における樹液通導部面積 (cm²)

Sv=樹液流速速度 (cm・hr⁻¹)

通導部面積は、生長錐を用いてもとめた辺材部面積とした。

日樹液流量は、樹液流量の日積算値として次式でもとまる。

$$Td = \int_0^{24} Sf(t) dt$$

ただし、Td: 日樹液流量 (cm³・tree⁻¹・hr⁻¹)

t: 時刻

表-2 供試木概要 (1984年1月)

Table 2 Outline of the sample trees (Jan., 1984)

調査区 Plot	供試木 Tree No.	樹高 H m	胸高直径 DBH cm	生枝下高 HB m	生枝下高直径 DB cm	樹液通導部面積 Sapwood area cm ²
Plot 1	11	6.5	7.5	2.0	7.4	36.6
	12	8.2	9.5	2.0	9.1	51.7
	13	6.9	8.8	2.0	8.7	42.2
	14	4.9	5.5	2.0	5.2	21.1
	15	7.5	11.5	1.9	11.4	97.6
	16	5.7	6.8	2.5	6.5	32.8
Plot 3	31	12.1	13.0	4.2	10.8	83.4
	32	11.1	10.3	4.1	9.2	60.2
	33	8.4	10.9	3.0	10.2	74.5
	34	10.0	13.8	3.2	12.1	108.9
	35	4.3	3.7	2.4	3.3	8.5
	36	8.7	7.5	4.0	6.0	28.1
Plot 5	51	14.1	23.5	9.8	14.1	132.4
	52	14.4	13.0	9.0	7.9	49.3
	53	15.7	17.5	10.3	10.4	68.6
	54	16.7	19.9	9.0	13.7	125.6
	55	16.6	22.4	7.4	16.4	134.5
	56	12.3	12.6	8.3	6.9	37.4

H: Height, DBH: Diameter at breast height, HB: Crown height,
DB: Diameter at crown height

Sf(t) : t 時における樹液流量 (cm³ · tree⁻¹ · day⁻¹)

なお、各測定時刻間の樹液流速度は、直線的に変化するものとした。

樹皮表面からの深さによって、辺材部内の樹液流速度に差のみられることが、アカマツ¹¹⁾などでは知られている。しかし、スギでは、辺材部内の深さによる樹液流速度の差は小さい。そこで、本研究では、辺材部内の樹液流速度は一様であるとして樹液流量をもとめた。日樹液流量は、日蒸散量とほぼ等しいと考えられるので、以下では、日樹液流量=日蒸散量として扱う。

3) 環境測定

Plot 3 の林冠外で、光合成有効日射量 (400~700nm, 4-7BR 型, 石川産業), 気温 (1983年 6月12日まではバイメタル温度計, 以後は, Pt100Ω をセンサーとする自記抵抗温度計 千野製作所), 降水量 (1983年 3月6日までは貯水型雨量計 手製, 以後は, 転倒マス雨量計, 大田計器) を測定した。Plot 1 で10, 20cm, Plot 3 で10, 30cm, Plot 5 で10, 40cmの深さで, 土壌のpF 値 (自記テンションメータ, SUN-W 手巻式, サン科学) を測定した。Plot 3 の林冠外で, 露点温度 (露点計, MC-B10-L, 小糸工業および MODEL 911, EG&G 社) を, 1983年 6月16

日以降自記測定し、風速（風杯式風量計、大田計器）を、1983年9月は、記録計の都合で蒸散量の測定日の日中のみ、10月以降は連続自記測定している。

日射量、気温、露点温度、風速は、1時間ごとの平均値を読みとり、土壌のpF値は、午前9時の値を読みとった。

III 結果と考察

各調査区あたりの年蒸散量の推定には、測定日以外の日の蒸散量と供試木以外の個体の蒸散量の推定が必要である。測定日以外の日の蒸散量の推定については、環境要因と蒸散量の実測値の対応関係を検討してすすめることが考えられる。また、供試木以外の個体の蒸散量の推定については、個体の大きさを表わすいくつかのパラメータと蒸散量との対応関係を基礎にしての検討が考えられる。

ここではまず、これらの検討をおこない、対応関係のよい環境要因とパラメータとから、調査区あたりの年蒸散量を推定する。つぎにその結果をもとに、斜面上の異なる位置での蒸散量の比較を行なう。

1 蒸散量の推定

1) 単木の日蒸散量の推定

i) 環境要因と日蒸散量

樹液流速度、日射量、気温、大気飽差、風速の日変化の一例として、1983年7月28日と12月7日にえた結果を図-4に示す。樹液流速度、日射量、気温、飽差は、比較的似た日変化を示した。風速が明確な対応を示さなかったのは、 $1.0\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$ 以下であることが多かったためと考えられる。土壌が最も乾燥したのは1983年5月28日で、各調査区のpF値は、Plot 1が2.65、Plot 3が2.20、Plot 5が2.15であった。このときも、土壌の乾湿の違いによる樹液流速度の日変化の違いは認められなかった。すなわち、土壌の乾湿の違いによる樹液流速度の日変化の違いは、ここでの測定期間にはおこらなかったと思われる。そこで、年間を通して測定され、かつ、もっとも密接な関係がみられた日射量を取りあげ、測定日以外の日の蒸散量の推定をこころみる。

1時間ごとの平均日射量と対応する各時刻の樹液流速度を図-5に示す。年間を通して測定した供試木のうち、各調査区で最も樹高の高い供試木についての値である。図に明らかなように、午前（日射量と樹液流速度が時刻とともに増加）と午後（日射量と樹液流速度が時刻とともに減少）で日射量と樹液流速度との対応関係に差がみられる。日射量の変化に対する、午前の樹液流速度の増加の割合に比べて、午後の樹液流速度の減少の割合は小さい。この傾向は、5月よりも9月、11月のほうが著しかった。午前と午後で差はあるが、日射量と樹液流速度は

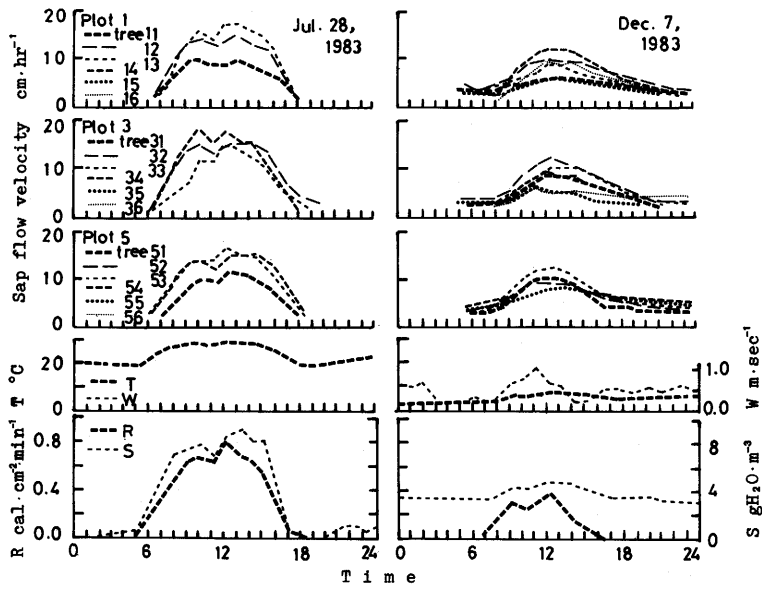


図-4 樹液流速の日変化

Fig. 4 Diurnal fluctuations in sap flow velocity
 S: Saturation deficit in the atmosphere, W: Wind velocity
 R: Radiation flux density, T: Temperature

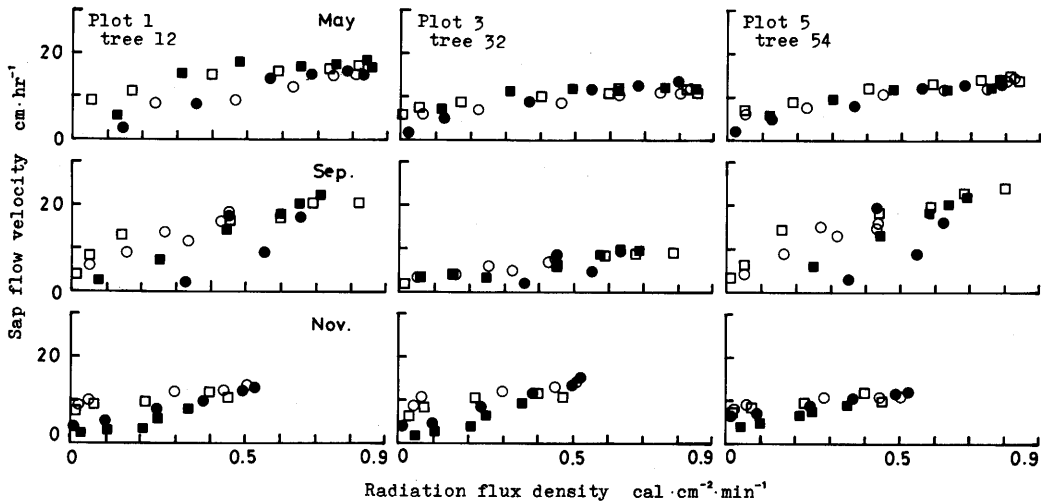


図-5 日射量と樹液流速

Fig. 5 Relationship between the radiation flux density and the sap flow velocity

- : Until noon on May 5, Sep. 3 and Nov. 14
- : From noon on May 5, Sep. 3 and Nov. 14
- : Until noon on May 8, Sep. 5 and Nov. 21
- : From noon on May 8, Sep. 5 and Nov. 21

比較的良好に対応しているといえる。

同じ供試木について、日射量と日蒸散量の季節的な対応関係を月別に図-6に示す。日射量の範囲が季節的に変化するほどには、日蒸散量は変化しない。日射量の11月の測定日の最高値は、5月の最高値の半分程度であるが、各供試木とも、各月の日蒸散量の最高値にはほとんど差がない。図-4に示すように、昼間の樹液流速の最高値は、冬期が夏期に比べてかなり小さく、昼間の蒸散量は夏期のほうが大きな値になるが、夜間の蒸散量は冬期のほうが大きいために、一日の蒸散量としては、季節的にあまり変わらない値になったと思われる。したがって、日射量と日蒸散量との対応関係を年間を通じて検討する場合、日射量の絶対値を用いるよりも、それぞれの季節の快晴日の日射量に対する相対値を用いたほうが好ましいと考える。なお冬期の夜間の蒸散量が大きいのは、大気飽差が、夏期の夜間のほぼ0に対して、冬期の夜間では $3\sim 4\text{ gH}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$ と大きいためと考えられる。

樹液流速の日変化は、晴天日は、午前中の上昇時間帯、正午前後の最高値付近での安定時間帯、午後下降時間帯の3つに区分できる。そこで、一日をこれらの時間帯に対応する、10時まで、11~13時、14時以降の3つに分け、季節ごとに、各時間帯における積算日射量の最高値(実測値)をもとめた。つぎに、各季節の最高値の0~25%を区分1、26~50%を区分2、51~75%を区分3、76~100%を区分4とする日射区分を設けた。

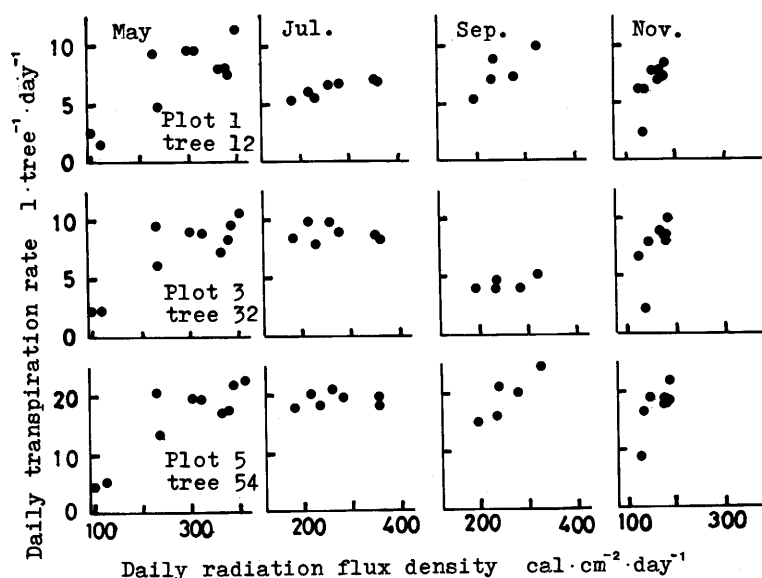


図-6 日射量と日蒸散量

Fig. 6 Relationship between the daily radiation flux density and the daily transpiration rate

それぞれの日射区分と天気の状態を比較した結果、おおよそ、区分1は雨天、区分2は曇り、区分3は薄曇りもしくは晴れたり曇ったり、区分4は晴もしくは快晴にそれぞれ対応した。そこで、3つの時間帯における日射区分の組み合わせでその日の天気を表現したものを天気区分と呼ぶことにした。たとえば、ある季節の3つの時間帯の積算日射量の最高値が、それぞれ、100, 160, 100cal \cdot cm $^{-2}\cdot$ min $^{-1}$ であるとする。その季節のある日の各時間帯の積算日射量がそれぞれ、40, 90, 60cal \cdot cm $^{-2}\cdot$ min $^{-1}$ であったとすると、10時までの相対積算日射量は40%なので、日射区分は2、同様に11~13時は、56.25%で区分3、14時以降は、60%で区分3となり、その日の天気区分は、「2 = 3 = 3」と表現される。このような方法で、1983年1月1日から12月31日までの毎日の天気を区分した。各天気区分に含まれる日数を表-3に示す。表中で、*印をつけた天気区分は、蒸散量の測定日を含む。

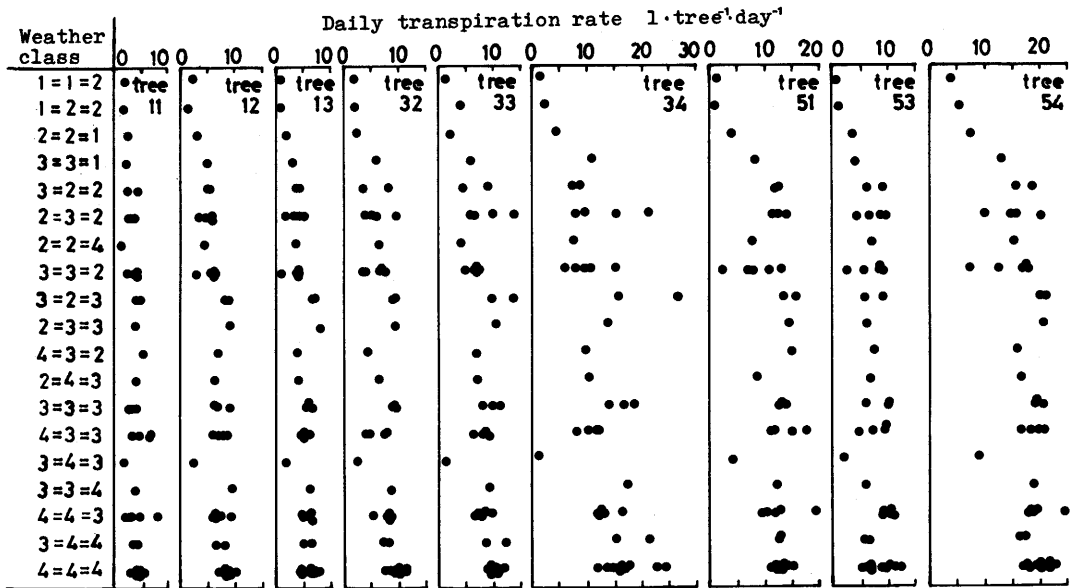
測定日について、各天気区分と単木あたりの日蒸散量との対応を図-7に示す。日蒸散量は天気区分「1 = 1 = 2」から「3 = 2 = 2」までは増加傾向、「3 = 2 = 2」から「4 = 4 = 4」まではあまりかわらない。しかしながら、天気区分「3 = 3 = 2」, 「3 = 4 = 3」などで全体の傾向からはずれる点もある。このようなばらつきが生じる最も大きな原因は降雨ではないかと考えられる。降雨により、葉がぬれると樹液流速は急激に低下し、雨があがり天気が回復しても、葉がぬれている間は、樹液流速は低く抑えられる¹⁷⁾。したがって、天気がよい(日射量が多い)わりに、日蒸散量が小さいということがおこる。たとえば、図-7の天気区分「3 = 4 = 3」の測定日(11月11日)は、明け方近くまで降雨があり、昼すぎまで葉がぬれていた。

表-3 各天気区分の日数(1983年)

Table 3 The number of days in each weather class in 1983

天気区分 Weather class	日数 No. of days	天気区分 Weather class	日数 No. of days	天気区分 Weather class	日数 No. of days
1 = 1 = 1	49	2 = 2 = 2	14	* 2 = 3 = 3	8
2 = 1 = 1	4	* 3 = 2 = 2	8	* 3 = 3 = 3	17
3 = 1 = 1	2	1 = 3 = 2	8	* 4 = 3 = 3	6
1 = 2 = 1	9	* 2 = 3 = 2	34	2 = 4 = 3	6
* 2 = 2 = 1	10	* 3 = 3 = 2	32	3 = 4 = 3	16
3 = 2 = 1	4	* 4 = 3 = 2	4	4 = 4 = 3	20
* 4 = 2 = 1	1	2 = 4 = 2	1	2 = 2 = 4	3
2 = 3 = 1	1	3 = 4 = 2	6	1 = 3 = 4	1
* 3 = 3 = 1	3	4 = 4 = 2	4	2 = 3 = 4	3
4 = 3 = 1	1	1 = 1 = 3	2	* 3 = 3 = 4	4
* 1 = 1 = 2	8	1 = 2 = 3	4	* 3 = 4 = 4	14
2 = 1 = 2	3	2 = 2 = 3	10	* 4 = 4 = 4	28
* 1 = 2 = 2	12	* 3 = 2 = 3	5		

* : Including days when transpiration measurement was made



図一七 天気区分と日蒸散量

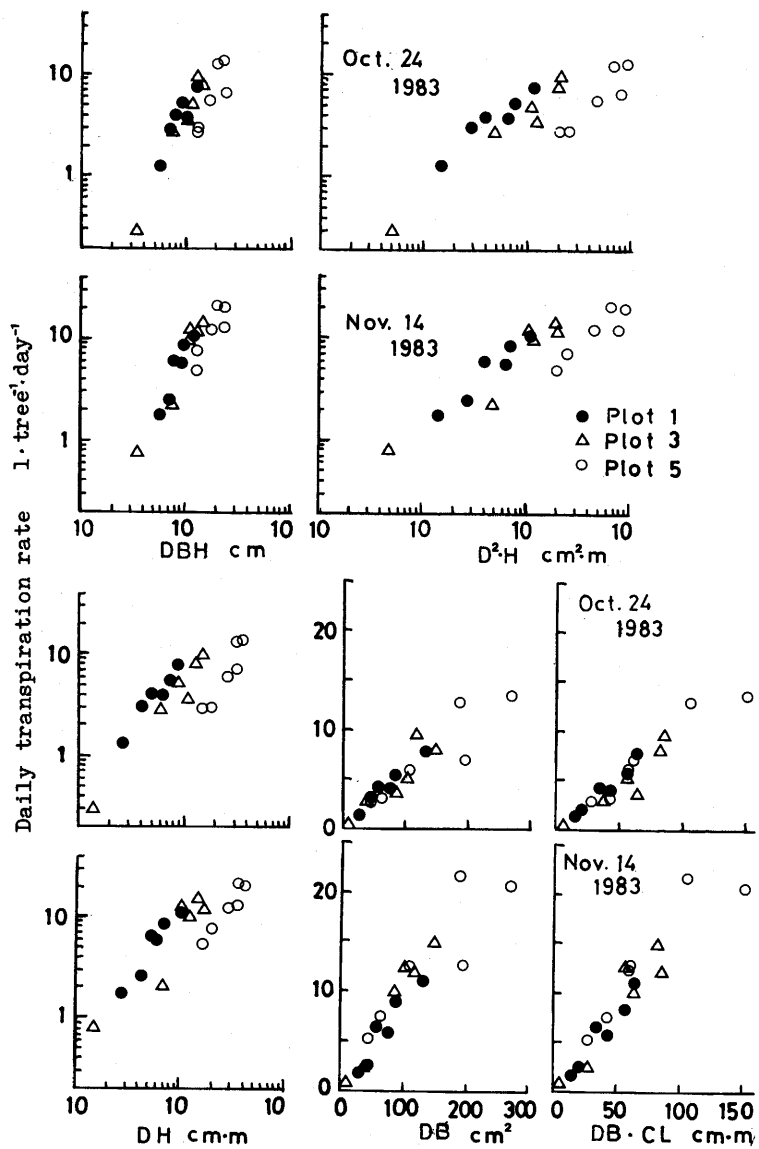
Fig. 7 Relationship between the weather class and the daily transpiration rate

このために、天気がよかったわりに、日蒸散量が抑えられたと言えよう。また、降雨の影響がなくなるまでにかかる時間は、風速や飽差にもよるが、個体間では、優勢木ほど短いと考えられる。このことも、単木あたりの日蒸散量と天気区分の対応関係のばらつきの原因と考えられる。

以上のように、昼間の時間帯の降雨は日射区分1と対応することが多く、蒸散量との関係をおおよそ評価できるが、昼間の時間帯以外や前日の降雨はここでの天気区分では評価できないという短所をもつ。しかし、天気区分には、季節にかかわりなく、日射量から日蒸散量を推定できる利点があり、年蒸散量推定の指標として天気区分は有効である。

ii) 個体の大きさと日蒸散量

各調査区とも供試木が6本ずつある9～12月の測定資料を用いて、DBH（胸高直径）、D・H（胸高直径と樹高の積）、 $D^2 \cdot H$ （胸高直径の二乗と樹高の積）、 DB^2 （生枝下高直径の二乗）、 $DB \cdot CL$ （生枝下高直径と樹冠長の積）と単木あたりの日蒸散量の対応関係をしらべた。比較的天気よかった、10月24日、11月14日における結果を図一八に示す。DBH、D・H、 $D^2 \cdot H$ と日蒸散量とは、各調査区ごとにはよく対応しているが、全供試木についてひとつの回帰式をあてはめることはむずかしい。DB²、DB・CLと日蒸散量とは、各調査区ごとでも全供試木でも、比較的よく対応している。2～8月にえた全供試木の日蒸散量についても、DB²、DB・CLは比較的対応関係がよい。



図一八 個体の大きさと日蒸散量

Fig. 8 Relationship between DBH, D·H, D²·H, DB², or DB·CL and the daily transpiration rate
CL: Crown length

また、調査地に隣接する同齡林分の Plot 1, Plot 3, Plot 5 に相当する場所で、林³⁾が1982年11月に、また、東京大学林学科造林学実験の一部としての千葉演習林での造林実習で1983年5月に、それぞれ、伐倒調査により葉量を調べている。その資料を用いて、個体の大きさを表

わすパラメータ、DBH、D・H、D²・H、DB²、DB・CLと葉量の関係を調べた結果、各パラメータと葉量との対応関係は、日蒸散量との対応関係と同じであった。そこで、葉量と比較的よく対応しているパラメータのDB・CLを用いて全供試木についてもとめた回帰式を各調査区にあてはめて計算した葉量は、Plot 1が29, Plot 3が33, Plot 5が26t・ha⁻¹であった。これらの推定値は、これまでに報告されているスギ林の葉量、たとえば、只木¹⁵⁾の19.6+4.4t・ha⁻¹に比べて多少大きめの値である。

個体の大きさと関係の深い各パラメータと日蒸散量および葉量の対応関係の検討を通して、次のことが言えよう。単木あたりの日蒸散量は、樹冠が大きな個体ほど大きい傾向がある。したがって、樹冠の大きさと関係の深いパラメータDB²、DB・CLとはよく対応する。個体の大きさと樹冠の大きさとがよく対応するような場合、すなわちここでは同一調査区では、個体の大きさと関係の深いパラメータであるDBH、D・H、D²・Hも日蒸散量とよい対応を示す。

表—4 回帰式 $Tr=a(DB \cdot CL)+b$ の係数、定数

Table 4 Coefficients and constants of equation $Tr=a(DB \cdot CL)+b$

DATE	a	b	r	DATE	a	b	r
Feb. 14	0.083	-1.188	0.739	Jul. 30	0.222	-3.889	0.954
	0.151	-2.999	0.701	Aug. 5	0.174	-3.995	0.943
Mar. 18	0.263	-3.470	0.805		0.208	-3.773	0.963
	0.222	-3.458	0.801		0.256	-3.816	0.962
Apr. 13	0.261	-4.732	0.857		0.212	-0.298	0.933
	0.272	-5.334	0.863	Sep. 3	0.121	0.595	0.874
May 5	0.188	-2.208	0.931		0.140	1.135	0.834
	0.157	-3.134	0.946		0.150	1.607	0.797
	0.032	-0.040	0.720		0.119	0.898	0.823
	0.234	-2.417	0.934		0.096	0.501	0.845
	0.241	-3.712	0.941	Oct. 23	0.055	0.352	0.940
	0.224	-3.450	0.924		0.098	0.151	0.946
	0.220	-3.083	0.930	Nov. 11	0.044	-0.171	0.754
	0.212	-2.342	0.912		0.119	0.650	0.875
	0.054	-0.962	0.726		0.120	0.330	0.878
	0.172	-1.740	0.894		0.159	0.585	0.932
Jun. 14	0.213	-3.151	0.933		0.122	0.733	0.904
	0.238	-3.842	0.937		0.130	0.690	0.896
Jul. 24	0.182	-2.705	0.871		0.129	0.098	0.918
	0.260	-4.511	0.870		0.120	0.391	0.929
	0.285	-5.312	0.920	Dec. 5	0.116	0.207	0.905
	0.224	-4.675	0.933	1983 6	0.114	0.410	0.895
	0.229	-3.803	0.941		0.117	0.518	0.882
	0.206	-3.607	0.973		0.097	0.315	0.853

Tr : Transpiration rate 1・tree⁻¹・day⁻¹ a : Coefficient b : Constant
r : Correlation coefficient

ヒートパルス法による樹液流速の測定には、測定可能な樹液流速の下限（およそ $2\sim 3\text{ cm}\cdot\text{hr}^{-1}$ ）の存在や、センサーの間隔や通導部面積の測定誤差などの測定法自体の誤差がある。DB²またはDB \cdot CLをパラメータにすれば、個体の大きさや密度と関係なく、供試木全部の資料を活用できるので、こうした測定誤差の測定値への影響を小さくできると思われる。

DB²にくらべ多少あてはまりのよかったDB \cdot CLと単木あたりの日蒸散量との関係の一次回帰式を、全資料（全供試木、全測定日）について最小二乗法によりもとめた。各測定日の回帰式の係数、定数を表-4に示す。年間を通じて蒸散量を測定した供試木について、実測値と先の一次回帰式を用いた測定値との比較を図-9に示す。推定値が実測値からかなりはずれる場合もあるが、ここでの目的にはほぼ満足できる推定法と言えよう。

2) 調査区の蒸散量の推定

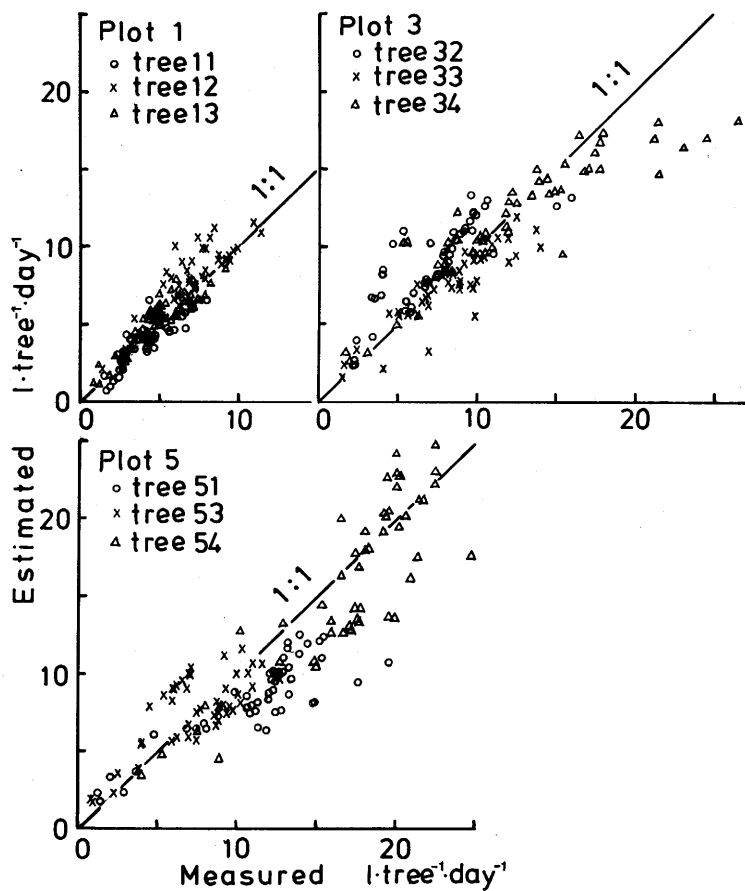


図-9 日蒸散量の測定値と推定値

Fig. 9 Relationship between the measured daily transpiration rate and the estimated one

DB・CL をパラメータとして、先にもとめた回帰式を、各調査区の全個体にあてはめて、測定日の調査区あたりの日蒸散量を推定した。各調査区の日蒸散量の範囲は、Plot 1 が0.6~3.9, Plot 3 が0.7~4.0, Plot 5 が0.5~3.3mm・day⁻¹であった。これらの測定日には、昼間のほとんどが雨天であるような日が含まれていない。それは、雨天の場合の樹液流速度がヒートパルス法で測定可能な下限値以下の流速であったためである。したがって、うえにあげた日蒸散量の範囲の下限は、実際にはもっと 0 mm・day⁻¹に近い値であると考えられる。

上記の調査区あたりの日蒸散量の推定値と天気区分を用いて、各調査区ごとの年蒸散量の推定を行なった。天気区分と調査区あたりの日蒸散量との対応を図-10に示す。図-7の個体との対応に比べばらつきが小さい。そこで、日蒸散量と天気区分の対応を考えながら、天気区分を5つの大区分にまとめた。

区分「1 = 1 = 2」と「1 = 2 = 2」からなる大区分2では、朝方から昼にかけて雨が降り、その後の天気の回復があまりよくなく、蒸散はかなり抑えられる。区分「2 = 2 = 1」と「3 = 3 = 1」からなる大区分3では、午前中から昼にかけては、天気は中程度によかったが、午後からくずれて雨が降り、午前中の蒸散量はその日の蒸散量の大部分を占める。区分「3 = 2 = 2」から「3 = 3 = 2」までからなる大区分4では、午前か午後のどちらかの天気が多少悪い場合である。区分「3 = 2 = 3」から「4 = 4 = 4」までからなる大区分5では、一日を通して比較的天気が良い場合である。以上のほかに、ほとんど一日中雨が降り、蒸散量が 0 mm・day⁻¹に近いと考えられる大区分1を設けた。

測定日を含まない天気区分も、上記の基準にもとづいて、大区分1~5にふりわけ、表-5に示す。大区分1~5に対応する各調査区の日蒸散量を、それぞれの測定日の蒸散量の平均値としてもとめ、表-6に示す。

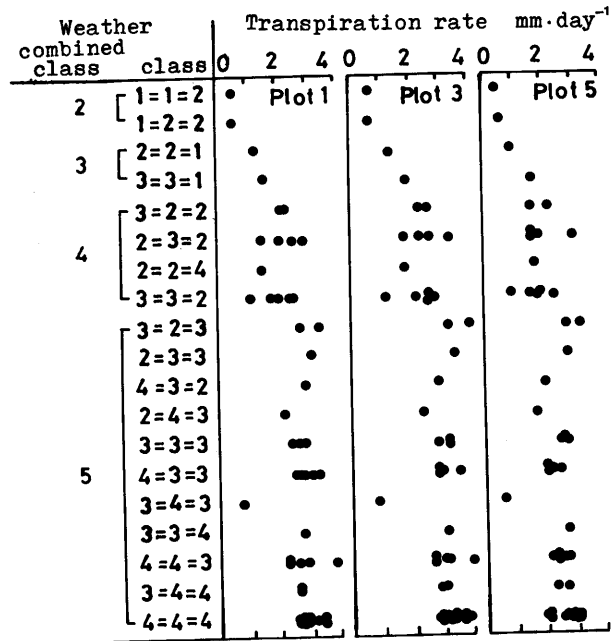


図-10 天気区分と各調査区の日蒸散量

Fig. 10 Relationship between the weather class and the daily canopy transpiration rate in each plot

表-5 天気の大区分

Table 5 Combined weather class

天気大区分 Combined weather class	天気区分 weather class				
1	1 = 1 = 1	2 = 1 = 1			
2	3 = 1 = 1 1 = 3 = 2	1 = 2 = 1 1 = 1 = 3	1 = 1 = 2 1 = 2 = 3	2 = 1 = 2	1 = 2 = 2
3	2 = 2 = 1 4 = 3 = 1	3 = 2 = 1	4 = 2 = 1	2 = 3 = 1	3 = 3 = 1
4	2 = 2 = 2 2 = 2 = 3	3 = 2 = 2 2 = 2 = 4	2 = 3 = 2 1 = 3 = 4	3 = 3 = 2	2 = 4 = 2
5	4 = 3 = 2 3 = 3 = 3 2 = 3 = 4	3 = 4 = 2 4 = 3 = 3 3 = 3 = 4	4 = 4 = 2 2 = 4 = 3 3 = 4 = 4	3 = 2 = 3 3 = 4 = 3 4 = 4 = 4	2 = 3 = 3 4 = 4 = 3

表-6 天気の大区分と平均日蒸散量 ($\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$)Table 6 Relationship between the combined weather class and the mean daily canopy transpiration rate in each plot ($\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$)

調査区 Plot	天気の大区分 Combined weather class				
	1	2	3	4	5
Plot 1	0.0	0.6	1.4	2.2	3.0
Plot 3	0.0	0.7	1.6	2.4	3.2
Plot 5	0.0	0.5	1.4	1.9	2.6

各大区分に含まれる日数と、表-6の数値から計算した各調査区ごとの月蒸散量を図-11に示す。春から夏にかけては、降水頻度の高い、6、7月が5、8月に比べて値が低い。また、天気から蒸散量を推定しているため、冬期の値が夏期にちかい。各調査区の年蒸散量を表-7に示す。

調査地の全林木についてDBとCLが測定されていれば、DB・CLをパラメータとする回帰式をあてはめて、調査地全体の蒸散量を直接推定できる。実際には資料を欠くので、ほかの方法による推定を試みた。すなわち、優勢木の樹高により調査地をPlot 1型、Plot 3型、Plot 5型の3つの区域に分け、それぞれの面積比から調査地の年蒸散量を試算した。1984年1月現在の樹高で、8mまでをPlot 1型、8~12mをPlot 3型、12m以上をPlot 5型とした。それぞれの面積比を等樹高線図(図-2)から求めた結果、Plot 1型が20%、Plot 3型が41%、Plot 5型が39%であった。したがって、この調査地の年蒸散量は690mmと推定された。この値は、年降水量2890mmの約24%にあたる。

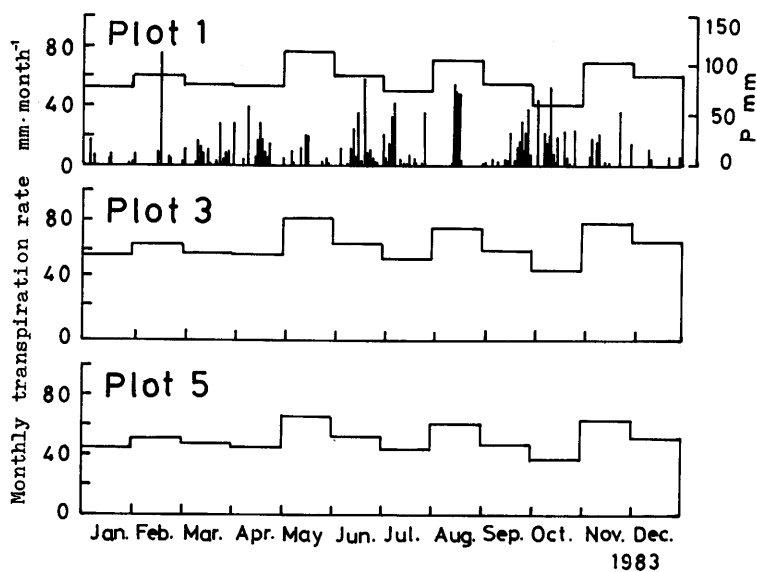


図-11 各調査区の月蒸散量

Fig. 11 Monthly canopy transpiration rate in each plot
P: Precipitation

表-7 年蒸散量 ($\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$)

Table 7 Annual canopy transpiration rate in each plot ($\text{mm}\cdot\text{yr}^{-1}$)

	Plot 1	Plot 3	Plot 5
蒸散量 Transpiration rate in 1983	710	760	610

2 斜面上部, 中部, 下部の蒸散量の比較

本調査地で, 1982年に樹液流速の日変化を測定したところ, 個体のおおきさや斜面上の位置が異なっても, 樹液流速の日変化のかたちには差がなかった¹⁷⁾。

今回の年蒸散量の推定では, 表-7のように, 立木密度が高く個体も比較的大きい Plot 3が760mmで最も多く, 個体は小さいが立木密度が高い Plot 1が710mmでこれに次ぎ, 個体は大きい而立木密度が低い Plot 5は610mmで最も少なかった。しかし, 単位葉量あたりの年蒸散量をもとめると, Plot 1が245, Plot 3が230, Plot 5が235t $\text{H}_2\text{O}\cdot\text{t dw}^{-1}$ で, 各調査区間にあまり差がない。このことは, 森川・丸山(未発表)が本調査地の各調査区で, スーパーポロメータを用いて, 陽葉と陰葉の単位葉量あたりの蒸散量の日変化を調べた結果とも一致する。たとえば, 1983年7月26日の例では日中の最高値が Plot 1の陽葉が94.5, Plot 3の陽葉と陰葉がそ

それぞれ114.1, 37.6, Plot 5の陽葉と陰葉がそれぞれ98.9, 42.0 $\mu\text{g H}_2\text{O}\cdot\text{g dw}^{-1}\cdot\text{sec}^{-1}$ であった。したがって、各調査区間の年蒸散量の差は、立木密度および個体の大ききのちがいがら生じる陽葉と陰葉の割合の差や葉量の差によると考えられる。本調査地における現在の樹高は、斜面上部と下部で著しい差がある。しかし、最近の樹高生長にはほとんど差がない。このことは、各調査区間の蒸散量に、現在大きな差がなかったことに対応すると思われる。

これまでに、スギ林の年蒸散量の値がいくつか報告されている。柴田¹³⁾は、圃場におけるスギの苗木の測定結果をスギ林にあてはめて、年蒸散量を392~495mmと推定している。佐藤¹²⁾は、柴田¹⁴⁾が京都で切枝法によりもとめた単位葉量あたりの蒸散量と千葉県下のスギ林の葉量から、年蒸散量を1230mmと算出している。また、中村¹⁰⁾は、切枝法による測定値とライシメータにおける幼齢木の蒸散量から、蒸散量を温度を変数とする関係式で表わした。この式と葉量からスギの年蒸散量を、844mm(福岡), 776mm(日田), 1000mm(飫肥), 555mm(阿蘇山)と推定している。

以上の推定では、生育期に比べ生育休止期の蒸散量はかなり小さいとされている。たとえば、佐藤が柴田の測定値から計算した値では、5~10月の4.8 $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$ に対して、11~4月は、1.9 $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$ である。ここでは、12月5日~8日の日蒸散量をPlot 1が2.0~2.4, Plot 3で1.8~2.3, Plot 5で2.0~2.4 $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$ と推定した。この値は、天気の大区分4での平均日蒸散量、Plot 1の2.2, Plot 3の2.4, Plot 5の1.9 $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$ と差がない。本研究では、1~2月の測定日が少ないので、蒸散が極端に低下する時期がないとは断言できないが、そのような期間はあったとしても短期間と考えられる。ちなみに、ヒートパルス法によりスギ林の蒸散量をもとめた井上⁴⁾は、11~12月に東京大学農学部付属演習林田無試験地で、2~3 $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$ の値をえており、ここでの推定値とほぼ同じであった。

要 旨

斜面の上方にむかうにしたがって樹高が低くなる19年生スギ人工林において、蒸散量の推定方法をこまかく検討し、生育に差を生じる原因を水分消費の面から考えた。斜面上部(Plot 1)、中部(Plot 3)、下部(Plot 5)に調査区を設け、供試木の樹液流量(=蒸散量)をヒートパルス法によりもとめた。ヒートパルス法による測定は、1983年2~12月にかけて、48日間行ない、日蒸散量を計算した。

蒸散量は環境条件や個体の大きさで変化する。供試木の日蒸散量は、日射量を基準にした天気区分とよく対応する。また、個体の大きさとの関係では、DB・CL(生枝下高直径と樹冠長の積)と、斜面上の位置にかかわりなくよく対応する。DB・CLと日蒸散量の関係をあてはめて推定した各調査区の日蒸散量は、Plot 1が0.6~3.9, Plot 3が0.7~4.0, Plot 5が0.5~3.3 $\text{mm}\cdot$

day⁻¹の範囲にある。

これらの日蒸散量と天気区分との対応関係からもとめた各調査区の年蒸散量は、Plot 1 が710, Plot 3 が760, Plot 5 が610mmとなる。各調査区の年蒸散量の大小は、葉量の大小と関係が深く、単位葉量あたりの年蒸散量には調査区間の差がない。このスギ林の斜面上部と下部では樹高に著しい差があるが、最近の樹高生長にはほとんど差がない。このことは、各調査区間の蒸散量に、現在大きな差がなかったことに対応すると思われる。

調査地を樹高に基づいて Plot 1 型, Plot 3 型, Plot 5 型に区分し、それぞれの面積比と各調査区の年蒸散量とからもとめた調査地の年蒸散量は690mmで、年降水量2890mmの約24%にあたる。

引用文献

- 1) 近嵐弘栄, 服部重昭: 斜面ライシメータにおける水収支(1)—暖候期における植被別の水収支—, 88回日林論: 399~400, 1977
- 2) 服部重昭: 熱収支法によるカラマツ林地の蒸発散量推定について, 88回日林論: 411~412, 1977
- 3) 林 康司: 斜面上に生育する20年生スギの生長経過と光合成能力—斜面上の位置による比較—, 東京大学農学部林学科卒業論文, 1983
- 4) 井上 堅: 林分蒸散量の推定法の検討—ヒートパルス法を用いて—, 東京大学大学院農学系研究科林学専門課程修士論文, 1977
- 5) 梶 晃太郎: 等樹高線について, 日林誌39: 164~168, 1957
- 6) MARSHALL, D.C.: Measurement of sap flow in conifers by heat transport, Plant Physiol. 33: 385~396, 1958
- 7) MORIKAWA Y.: Daily transpiration of a 14-year-old *Chamaecyparis obtusa* stand, J. Jpn. For. Soc. 53: 337~339, 1971
- 8) 森川 靖: 樹液流測定装置と測定法, 日林誌54: 166~171, 1972
- 9) 森川 靖: ヒノキの樹液の流れ—林木の水分収支と関連して—, 東大演報66: 251~297, 1974
- 10) 中村義司: スギの林木ならびに林分の水分経済に関する研究, 九大演報38: 161~238, 1964
- 11) 大櫛政行, 及川武久, 森川 靖: 平地アカマツ林の熱収支・水収支特性について (「霞ヶ浦および周辺域の生態系動態に及ぼす人間活動の影響」研究班編, 「霞ヶ浦とその周辺の生態系動態」第三章), 「環境科学」研究報告集 (課題番号 B93-R12-2), 15~35, 1981
- 12) 佐藤大七郎: 森林の蒸散量, 科学28: 205, 1958
- 13) 柴田信男: スギ林とその環境, スギのすべて (佐藤弥太郎編), 272~273, 1950
- 14) 柴田信男: スギ・ヒノキ・アカマツの造林学的取扱方に対する基礎的考察, 京大演報2: 19~32, 1951
- 15) 只木良也: 森林の現存量—とくにわが国の森林の葉量について—, 日林誌58: 416~423, 1976
- 16) 丹下 健: 土壌の2・3の理化学性とスギの生長, 34回日林関東支論: 67~68, 1982
- 17) 丹下 健: 斜面上の異なる位置に生育するスギの樹液流速の日変化, 94回日林論: 313~314, 1973

(1986年5月31日受理)

Summary

It is well-known that the growth of *Cryptomeria japonica* on the slope decreases from the bottom to the ridge. To discuss causes of this growth depression from the point of water consumption, a method for estimating the difference in canopy transpiration rate was studied along a slope.

Measurements of sap flow velocity using heat-pulse method were made on the three plots, Plot 1 near the ridge, Plot 3 near the middle of slope and Plot 5 near the bottom, in a 19-year-old *Cryptomeria japonica* stand where the tree height became lower with ascending the slope. Diurnal courses in sap flow velocity of 3 to 6 sample trees in each plot were obtained for 48 daytime periods from February to December in 1983.

The transpiration rates per tree were calculated by multiplying the sap flow velocity by the cross section area of sapwood. Since the sap flow velocity was affected by radiation, the daily transpiration rates were closely correlated with the weather class classified by radiation flux density. The transpiration rate increased with tree dimension and was correlated with several parameters indicating the dimension, especially with the DB·CL, diameter at crown height × crown length irrespective of difference in tree height among the plots. The canopy transpiration rate in each plot was estimated by using the weather class and the parameter DB·CL.

The daily canopy transpiration rates estimated were 0.6~3.9 in Plot 1, 0.7~4.0 in Plot 3, and 0.5~3.3 mm in Plot 5, and the annual ones were 710 in Plot 1, 760 in Plot 3, and 610 mm in Plot 5. The difference in canopy transpiration rate among the plots is probably caused by leaf amount and the difference in transpiration rate per unit leaf weight is not remarkable. Height growth rate in recent years did not differ among the plots which may be corresponds with not apparent difference in water consumption. The annual canopy transpiration rate averaged in the entire study area was 690 mm, which amounts to 24% of the annual precipitation 2890 mm in 1983.