

スギの林木ならびに林分の水分経済に関する研究

中村, 義司

<https://doi.org/10.15017/15003>

出版情報 : 九州大学農学部演習林報告. 38, pp.161-238, 1964-11-28. 九州大学農学部附属演習林
バージョン :
権利関係 :

スギの林木ならびに林分の水分経済に関する研究

中 村 義 司

Yoshiji NAKAMURA

Study of the Water Economy of Trees and Tree Stands of SUGI
(*Cryptomeria japonica* D. Don.)

目 次

- はしがき
- 第1部 種子の水分経済
- I 種子の発芽にともなう吸水経過
- 第2部 苗木・幼木の水分経済
- I スギの含水率
1. 緒 論
2. スギ各器官の含水率
3. 葉の含水率の季節変化
4. 土壤水分と器官の含水率
- A. 苗木の場合
- B. 幼木の場合
5. 品種によるちがひ
6. 考 察
- II スギの蒸散作用
1. 蒸散量の測定方法
2. 蒸散作用に影響する環境因子
- A. 温度との関係
- (a) 切枝の場合
- (b) 苗木の場合
- B. 飽差との関係
- C. 土壤水分との関係
- D. 天候との関係
- E. 考 察
3. 蒸散作用に影響する内的因子
- A. 葉令・葉位との関係
- B. 苗木各器官の大きさとの関係
- C. 葉の含水率との関係
- (a) 天候との関係
- (b) 葉位との関係
- (c) 葉令との関係
- (d) 品種によるちがひ
4. 葉の乾燥経過
- A. 葉令との関係
- B. 葉位との関係
- C. 品種によるちがひ
5. 蒸散作用の季節変化
- A. 切枝の場合
- B. 苗木の場合
- C. 幼木の場合
- D. 考 察
6. 蒸散係数
- III 土壤水分とスギ幼時の成長
1. 地温との関係
2. 成長との関係
3. 相対成長との関係
- A. 材木各器官の配分割合
- B. 形状比, T/R比
- C. 葉量と他の器官の成長
4. 成長周期との関係
5. 考 察
- IV 幼令林の水分収支
- V 総合考察
- 第3部 成木の水分経済
- I 森林土壤の含水率
- II スギ林の水分収支
1. 緒 論
2. スギ林からの蒸散量
- A. 苗木の蒸散量からの推定

B. 蒸散量の推定式	1. 林木について
C. スギ林の葉量	2. 林分について
D. スギ林の蒸散量	3. 考 察
3. スギ林の水分収支	
4. 考 察	摘 要
III 連年成長におよぼす雨量の影響	文 献
第4部 スギの林木ならびに林分についての水分収支試算	résumé

は し が き

林業の最終目標は木材の生産であり、造林学の研究は収穫にいたる成長のプロセスを生理、生態的に究明することであって、今までにいろいろなことがわかっているが、定性的な部分が多く、定量的にわかっていることは意外にすくない。木材の生産は自然に依存する度合が、他の一次産業にくらべて大きく、われわれは育種や撫育、林地処理といった手段によって成長量の増大をはかっている。しかもこうした処理や手段の基礎になるのは、各種のファクターとの定量的な関係である。推測にもとづく定性的な解析ではなく、定められたルールにしたがって定量的に解析し、論議することが要求されている。水と林木の成長との関係については、土壤水分や雨量等の立地要因からと、林木自体の水分関係からの解析が可能である。従来森林が成立するための条件として、最低 500mm の降雨が必要だといわれているが、林木自身の解答をまだ得ていない。

この論文は、わが国における主要な造林樹種の一つであるスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don.) を、水分経済上の立場から定量的に解析したものであって、以下の部分からなりたっている。

第1部 種子の水分経済

第2部 苗木、幼木の水分経済

第3部 成木の水分経済

第4部 スギの林木ならびに林分についての水分収支試算

本研究を遂行するにあたり、たえず御指導いただいた恩師九州大学教授佐藤敬二博士に対し、満腔の謝意を表す。

また次にあげる多くの方々に御指導、御鞭撻をいただいた。あわせて深謝の意を表す。九州大学助教授加藤退介氏、演習林助教授宮島寛博士、演習林辻木達郎博士、造林学教室須崎民雄氏、奈良学芸大学助教授平田善文氏、岩手大学農学部講師永野正造氏、九州林木育種場塚原初男博士、また大学院斎藤明氏はじめ造林学教室の人達には、公私にわたって御世話になった。あわせて御礼を申し上げる。

第 1 部 種子の水分経済

I. 種子の発芽にともなう吸水経過

種子の発芽には、温度、水分、酸素等の外的条件や、種子自身の後熟度その他の内的条件が関与している。種子は発芽する前に水分を吸収して水膨する。水膨は物理的現象であって、その際の水膨圧の発生は、種子発芽に有利な現象である。種子は内圧によって種皮を破り、発芽条件として熱を要求する。種子に吸収された水分は、貯蔵物質を加水分解して、胚に養分を供給する。発芽にともなう吸水経過は、SHULL(1920), STILE(1948), 郷(1951, 1956, 1960), 浅川(1956), KOZLOWSKY(1958)等によって、かなりはっきりしたことがわかっている。郷が、スギ、アカマツ、クロマツでしらべた結果、発芽する種子の吸水経過は、次の三つの部分からなる S カーブを描いた。(1) 置床後 1—2 日間に急速な上昇を示す部分、(2) 上昇がかんまん、あるいはほとんど止まっている部分、(3) 急速に上昇する部分からなり、未発芽種子には(3)の部分がみられない。各部分の吸水上の特徴については、(1)は水の拡散、(3)は生活現象と関係すると述べている。こうした S カーブを描くことは、White Pine⁶³⁾、チョウセンマツ、アカマツ、カラマツでもたしかめられている。渡辺(1953)によれば、ハゼノキの種子は、置床後長い間吸水しない部分があり、そのあとは、スギやマツと同じように S カーブを描いた。佐藤(大)・郷(1954)は、サトウミズで種子の吸水力をしらべたが、その結果、スギ、ヒノキは 0.35 mol (9.58 気圧)、アカマツ 0.4 mol (11.1 気圧)、クロマツ 0.45 mol (12.7 気圧)であることがわかった。この種子の吸水力は、苗畑で経験する耐乾性のつよきの順序と一致した。郷・平松(1956)は、スギ、ヒノキ、アカマツ、クロマツのタネの成熟との関係をしらべたが、球果の含水率は、(1)受精後、タネがはじめて発芽力をしめすころまで急にへる時期、(2)タネがとびだす前まで、ほとんど、またはすこししかへらない時期、(3)タネがとぶ前に急にへる時期にわかれた。タネの含水率は、発芽力をしめすころまで急にへるが、それからとはび出すまですこしずつ減った。

温度は、発芽に最も大きな影響を及ぼす要素の一つで、もし温度が適当でないならば、他の条件が適当でも発芽することはできない。SHULL(1920, 1924)は、温度と吸水との関係を数量化したが、一般式は

$$y = a \log_{10}(bx + 1) + c$$

であった。ただし y は吸水量 (%), x は時間, a, b, c は常数。温度が高い程吸水はよく、Xanthium では、5°C のとき $y = 48.5 \log_{10}(0.098x + 1) + 0.85$, 20°C のとき $y = 61.5 \log_{10}(0.0136x + 1) + 1.46$, 35°C のとき $y = 74.5 \log_{10}(0.0148x + 1) + 2.25$ であった。また Split peas では、5°C のとき $y = 30.13 \log_{10}(0.148x + 1)$, 20°C のとき $y = 34.58 \log_{10}(0.28x + 1)$, 30°C のとき $y = 60.90 \log_{10}(0.172x + 1)$ であった。

ここでは発芽期間に 2 回温度をかえて、変温が吸水に及ぼす影響をしらべてみた。

方法・材料

15, 25, 33°C を基本的な温度として選び、3 日目と 8 日目の 2 回温度を変えた。発芽床に種子をおいてから 2 日間を I 期、3—7 日を II 期、8 日目以降を III 期とすると、実験

の温度組合せは、次に示す27通りとなる。

I 期	II 期	III 期
15°C	15°C	15°C
—	—	25
—	—	33
—	25	15
—	—	25
—	—	33
—	33	15
—	—	25
—	—	33
25	15	15
—	—	25
—	—	33
—	25	15
—	—	25
—	—	33
—	33	15
—	—	25
—	—	33
33	15	15
—	—	25
—	—	33
—	25	15
—	—	25
—	—	33
—	33	15
—	—	25
—	—	33

変温時期は郷²⁷⁾28)29)30) その他³⁾³³⁾⁸³⁾の結果から、物理的な拡散の時期と、加水分解がはじまると考えられる時期に対応させた。材料は、九州大学粕屋演習林生ケ谷団地から、1963年10月に採取し、実験は普通の発芽試験と全く同じで、1処理あたり10粒をシャーレの口紙にマークして並べた。実験は11月13日からファイトロンでおこなった。

結 果・考 察

種子を発芽床においてから発芽するまでの含水率の変化は Fig. 1, 2, 3 に示される。種子の吸水は、最初の1—2日間に急速に増大し、それ以降は発芽するまであまり変化はみられなかった。置床後2日目及び発芽時の含水率は Table. 1 に示すように、15°Cで28%、25 33°Cは32%で、高温側の含水率がやや高かった。発芽時の含水率は15°Cで73%、25°Cで87%、33°Cで76%であって、発芽適温に近い25°Cでの発芽時の含水率が最も高く、適温をはなれるにつれて低含水率でも発芽した。

Table. 1 Relation between temperature and moisture content of seeds at 2 days since start of test and at germination.

	15°C	25°C	33°C
At 2 days	28%	32%	32%
At germination	73	87	76

Table. 2 Analysis of variance
At 2 days

Source	DF	SS	MS	F
Temperature	2	122	61	2.6 not sig.
Replication	8	331	41	1.78 not sig.
Error	16	369	23	
Total	26	822		

At germination

Source	DF	SS	MS	F
Temperature	2	873	437	1.44 not sig.
Error	19	5744	302	
Total	21	6617		

しかし分散分析の結果は Table. 2 に示すように、2日目と発芽時の含水率には、温度間に有意差がみとめられなかった。したがってこの程度の温度範囲では、発芽までの種子の吸水に影響するとはいえないようだ。しかし一たん芽がでてからの吸水は、高温ではあきらかに早く、芽の伸びにもなって直線的に増加するが、低温での吸水はかんまんであった。また一度種皮が破れても、含水率はあまり増加せず死んでしまう種子もあった。この関係は定温状態よりも、高温から低温へ、あるいは低温から高温へ移行する処理にはきりとあらわれる。

Fig. 1 Process of water absorption by seeds at constant temperature

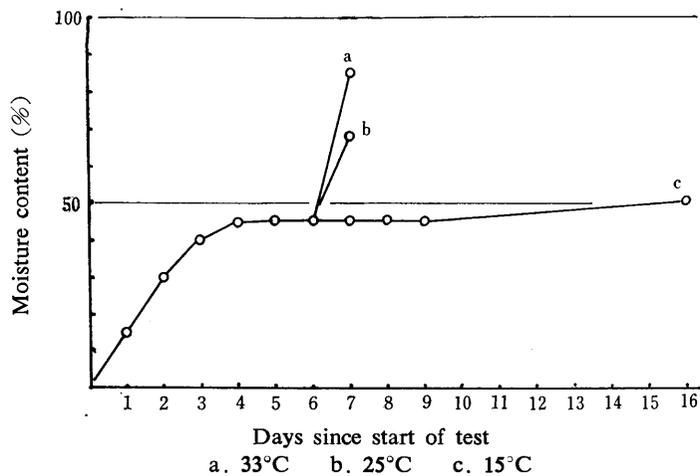
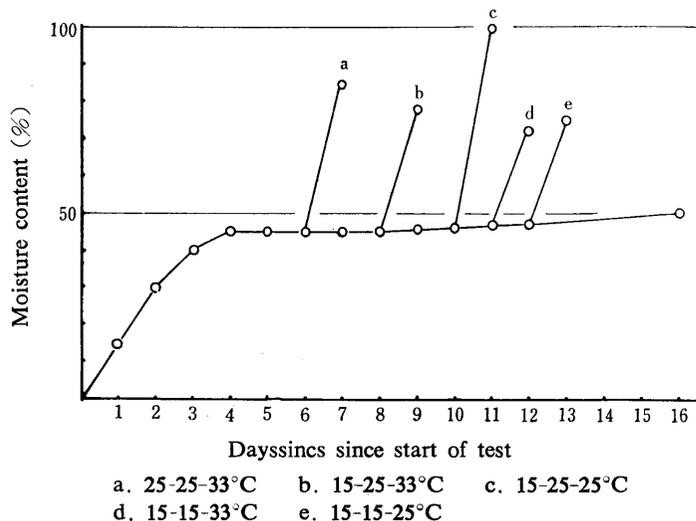


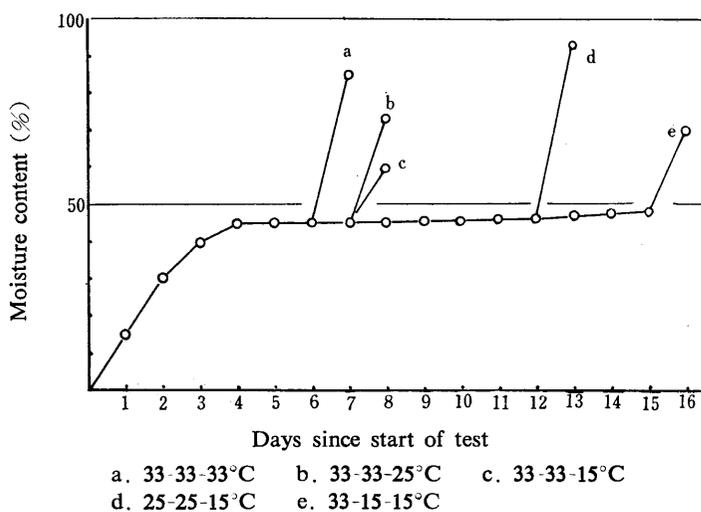
Fig. 1 は試験期間中 15, 25, 33°C の定温状態においた場合であって, 15°C では 21 日まで発芽せず, 含水率も 50% を前後した. 25 33°C では 7 日目に発芽した. この時の含水率は 25°C が 68%, 33°C が 85% であった. Fig. 2 は低温から高温へ移行する場合で, I 期

Fig. 2 Process of water absorption by seeds at controlled temperature



25°C, II期 25°C, III期 33°C (以下 25-25-33°C) では, 7 日目に発芽し, 含水率は 85% であった. 15-25-33°C では 9 日目に発芽し 78% であった. さらに低温になると発芽が遅れる. しかし発芽の遅速と含水率とはかならずしも相関がないようである. Fig. 3 は高温

Fig. 3 Process of water absorption by seeds at controlled temperature



から低温へ移行する場合で, 33-33-25°C と 33-33 15°C では 8 日目に発芽し, 含水率は 73% と 60% であった. 温度較差が大きくなるほど発芽が遅れ, 33-15-15°C では 16 日目に含水率 70% となって発芽した.

種子の発芽における水の役割は、吸水による水膨現象であり、それにともない各部に水膨圧を生じ、種皮を破って胚の出現を容易にし、同時に酵素に働きかけて、貯蔵物質を加水分解して転流し、胚に供給する。この際要求される水分量は、平均、風乾重の80%であって、種子の風乾重は平均4.3mgだから、水分量は3.5mgと計算される。

第2部 苗木・幼木の水分経済

I スギの含水率

1. 緒言

生理的なプロセスや状態に関して最も重要な植物の水分関係は、内部的な水分状態である。“Water balance” “Water deficit” “Water economy (Wasserhaushalt)” の用語が MAXIMOV や MONTFORT によって用いられてきた⁶⁷⁾。

水は生活している細胞質のうちでは最も普通の成分で、根や茎の生長点では生重の85—90%をしめ、本質部でも50%は水である。含水率の減少は、生理作用の低下と結びついていて、もし含水率が過度に低下すると、乾燥のために枯死する。水分は植物体内で、同化作用や加水分解を含めたさまざまな生理的プロセスにおいては媒介として作用し、それは炭酸ガスや窒素と同じような役割において重要である。また無機質、ガスその他の溶液が植物体に吸収され、そして植物体内で細胞から細胞へ、器官から器官へと移動する時、溶媒として作用する。その他植物体の膨圧を維持するために重要で、このことは生長や葉の型をととのえるのに必要である。生長との関係は、細胞分裂のためにはかなり高い含水率を維持する必要があるといえる。植物の水分関係は、成長のみならず同化や呼吸作用の生化学的プロセスにおいて重要なことはあきらかである。

ここでは苗木、幼木の器官の含水率を年令との関係においてしらべ、環境との関係として土壌水分との相関を、成長との関係においては季節変化をあきらかにした。さらにアヤスギ、ホンスギ、メアサ、ニンジンバ、ウラセバル、ヤブクグリの一年生葉の含水率をしらべ比較した。

2. スギ各器官の含水率

方法、材料

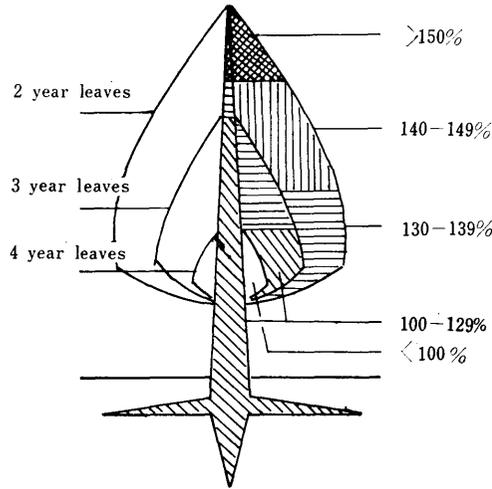
幼令のアカバ、メアサを材料にして樹体内各器官の含水率をしらべた。アカバは4年生、苗畑の赤土に生育するもので、1962年4月根付のまま掘り取り、地上部、地下部を切りはなし、地上部は幹、葉を年令別にサンプリングし、絶乾に対するパーセントを求めた。メアサは6年生、砂土に生育するもので、葉令、クローネの部位との関係をしらべた。

結果、考察

A. アカバの含水率分布

各器官の含水率から含水率分布図を描くと Fig. 4 のようになった。

Fig. 4 Distribution of moisture content of young tree, Akaba
(Clone of *Cryptomeria*), 4 year, April 1962



一般に組織が若い程含水率が高く、成熟するにつれて、セルロース等の集積のために水分は相対的に少なくなると考えられる。梢端の若い組織が160%の含水率を示し、最も高い。反対に4年生の葉は94%で最も低い。これを模式的にみれば、タテ軸では上部程、ヨコ軸では外周程、含水率が高かった。

B. メアサの葉令、クローネの位置との関係

1963年4月の晴れた日の葉の含水率は、次のようであった。1年生葉128%、2年生葉109%、クローネ上部の葉は138%、中部の葉は139%、下部の葉は132%であった。クローネ上、中部の1年生葉の含水率に差はなかったが、アカバにみられたことが、メアサにもほぼあてはまると考えられる。

3. 葉の含水率の季節変化

方法、材料

4年生アヤスギ、ヤブクグリの幹、葉を年令別に切りはなし、葉令と葉位にもとづく葉の含水率の季節変化をしらべた。1962年4-10月まで、毎月10日前後に測定した。土壤は砂壤土、サンプリングの時は適潤状態にあるように、灌水によって土壤水分を調節した。

結果、考察

ヤブクグリの葉の含水率の季節変化はTable. 3に示される。幹の年令は当年伸長した部分を1、前年伸長した部分を2とし、それぞれの幹につく葉を1、2、3年生葉とした。1-2年生葉は5-6月に第1の山があらわれ、第2の山は1年生葉では8月に、2年生葉では9月にあらわれた。1年生葉でも3年生の幹につくもの（この個体ではクローネ下部）は、5月から7月にかけて含水率が低下し、あとはあまりかわらない。3年生葉になると系統的变化はみられない。クローネの部位を考慮すると、各月とも1年生幹についている葉の含水率はつねに高い。1-2年生幹につく葉は、5-6月に含水率が増加するが、3年生幹につく葉は6月に減少する。5月と10月の1年生葉の含水率は、クローネの部位

Table. 3 Seasonal changes of moisture content of leaves, Yabukuguri
(Clone of *Cryptomeria*)

Age of stem Age of leaves	1			2			3		
	1	1	2	1	2	3	1	2	3
April	—	—	151	—	133	130	—	133	130
May	440	429	226	417	173	101	417	173	101
June	552	468	292	341	212	130	341	212	130
July	322	248	183	243	179	126	243	179	126
Aug.	351	277	185	240	169	120	240	169	120
Sept.	279	260	204	251	169	115	251	169	115
Oct.	257	222	183	222	174	113	222	174	113

によってあまりちがわなかった。2年生葉ではクローネの下部程含水率は低い。2年生幹につく2年生葉は、9月に小さな山がみられるが、3年生幹につく2年生葉には、6月に山がみられるだけで7月以降はあまり変化しない。3年生葉になると系統的变化はみられない。古い葉は、1年を通じてかなり安定していると考えられる。

アヤスギとヤブクグリの葉令別の含水率の変化を比較すると、Table. 4になる。1年生葉の含水率は8月以降漸減するが、2年生葉では9月に小さな山があらわれる、というパターンは両品種に共通である。量的にみれば1年生葉ではヤブクグリが、2年生葉ではアヤスギが、葉の含水率が高い結果を得た。すなわち、葉令間における含水率の差は、アヤスギで小さく、ヤブクグリで大きい。

Table. 4 Comparison Ayasugi with Yabukuguri by moisture content of leaves
Ayasugi

Age of leaves Age of stem	1				2			
	1	2	3	Mean	2	3	Mean	
July	—	—	—	—	290	228	259	
Aug.	342	232	269	281	189	203	196	
Sept.	269	254	249	257	209	195	202	
Oct.	223	213	200	212	198	161	180	
Mean				250			209	

Yabukuguri

Age of leaves Age of stem	1				2			
	1	2	3	Mean	2	3	Mean	
July	322	248	243	271	183	179	181	
Aug.	351	278	240	290	185	169	177	
Sept.	279	260	251	263	204	169	186	
Oct.	257	222	222	234	183	173	178	
Mean				262			189	

4. 土壌水分と各器官の含水率

土壌水分と林木の体内水分との関係については、すでにかなり報告されている。

KITREDGE (1948) によれば、凋萎点以上では土壤水分と植物の含水率との間にあまり関係がない。佐藤 (大)・名村 (1953) がアカマツのマキツケ苗でしらべた結果、苗の含水率は土が乾いても凋萎点になるまではほとんど変わらないが、これ以下に乾くと急に減少した。加藤 (1954) がカラマツでしらべたところ、土の容水量にたいして20%になるまでは、滲透価、含水率に大きな変化はみられなかった。岡崎 (1951) もスギ、ヒノキの稚苗で同様な結果をえた。佐藤 (大) (1957) はスギ、ヒノキ、アカマツのマキツケ苗でしらべて、苗の含水率は、土に有効水分が残っている間は、あまりめだつた変化はせず、かつその変化に一定の傾向はもたないと結論した。

A. 苗木の場合

方法, 材料

アヤスギのサシキ苗 (クローンコンプレックス) を用いて土壤含水率と新葉, 旧葉, 茎, 根の含水率との関係をしらべた。1963年7月に圃場を灌水, 土壤を飽和させてから自然に乾燥させた。土壤乾燥の経過にあわせて, 適当な時期に苗を掘りとり, 同時に根系層に相当する地表から5 cmの深さから, 土壤を採集した。苗木は各器官にわけて秤量105°Cで24時間乾燥したのち, 絶乾に対するパーセントを求めた。土壤は赤土, 最大容水量48%, 圃場容水量は35%である。

結果, 考察

測定結果をまとめると Table. 5 のようになり, これを図に示すと Fig. 5 になる。

Table. 5 Relation between soil moisture content and moisture content of seedlings of Ayasugi (Clone of *Cryptomeria*)

Soil moisture content, %	Moisture content of seedling, %			
	Root	Stem	Old leaves	New leaves
35%	108%	91%	163%	267%
25	—	92	165	270
25	—	82	148	303
17	106	83	126	218
16	120	73	156	256
14	115	91	144	259
12	126	86	129	205
11	148	99	156	217
9	92	97	159	220
4	—	—	—	66

土壤含水率が9%以上では、苗の含水率にそれほどめだつた変化があるとはいえない。新葉は、圃場容水量付近では300%近い含水率を示し、土壤が10%まで乾くと、葉も210%ぐらいまで水分が失われる。それ以下まで土が乾くと葉がしおれはじめる。4%では旧葉はすでに枯死し、新葉も66%で乾燥し、もはや凋萎から恢復しなかった。すなわち新葉は、旧葉よりも、いくらか時間的に遅れて枯れる。旧葉は凋萎の以上では150%前後、茎は90%前後でかなり安定している。根の含水率は土壤含水率が11%ぐらいのときが最も高く、

圃場容水量にむかっては徐々に、凋萎点にむかっては急速に低下する結果が得られた。土壤含水率と苗木の含水率との関係を模式的にみると、成長活動の不活発な旧葉や茎は、凋萎点以上では系統的な変化はみられない。新葉の含水率は土壤が乾くにつれて低下し、根の含水率は凋萎点より少し湿ったあたりで、一時的に高まるものと考えられる。

B. 幼木の場合

方法, 材料

苗木と全く同じ方法で、4年生アカバの1年生葉の含水率と、土壤含水率との関係をしらべた。

結果, 考察

結果は Table. 6 に示される。

Table. 6 Relation between soil moisture content and moisture content of leaves of young trees, Akaba. (Clone of *Cryptomeria*)

Soil moisture content, %	Moisture content of leaves, %
30	236
18	238
16	236
15	233
11	222
10	223

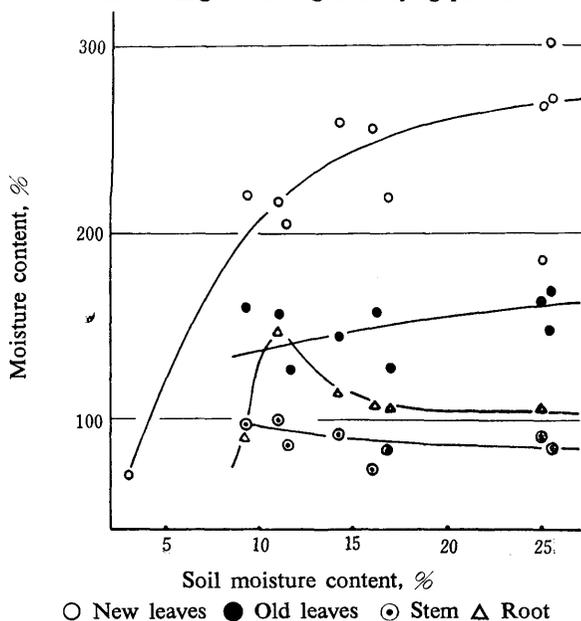
土壤含水率が凋萎点以上では、1年生葉の含水率はあまり変わらないが、土壤が乾いている方が葉の含水率も低いようである。ただし、絶対的なものとはいえないかもしれない。凋萎点以上で、1年生葉の含水率があまり変わらないのは、土壤乾燥に対する植物の水分関係の適応が、まず蒸散量を低下することによって、体内の水分のバランスを保っているからと考えられる。苗木の結果と比較してみると同じ範囲にちらばり、この実験では苗木と幼木の間、ちがいがあるとはいえなかった。

5. 品種のあいだのちがいについて

方法, 材料

1963年2月と7月に1年生葉の含水率を測定し、休眠期と成長期における品種間の比較

Fig. 5 Variation of moisture content of the several parts of seedlings following soil drying process



をおこなった。材料は苗畑に生育するアヤスギ、ホンスギ、メアサ、ニンジンバ、ウラセバルの幼令木（5—6年生）である。葉の採取位置はクローネ上部で、くり返しは3回であった。

結果、考察

結果は Table. 7 のようになった。分散分析の結果、成長期、休眠期とも品種間に5%水準で有意差が認められた。含水率の高い順に並べると、両シーズンとも、ウラセバル、アヤスギ、メアサ、ホンスギ、ニンジンバとなった。成長期では、アヤスギはニンジンバ、ホンスギと、ウラセバルはホンスギ、メアサ、ニンジンバとの間に有意差がみとめられ、休眠期では、ウラセバルはニンジンバと、ニンジンバはアヤスギ、ホンスギ、メアサ、ウラセバルのすべての品種との間に有意差がみとめられた。

Table. 7 Comparison among the clones by moisture content of leaves

Clones	Summer				Winter			
				mean				mean
Ayasugi	283	239	218	247	144	136	139	140
Honsugi	211	194	215	207	127	127	132	129
Measa	220	245	200	222	132	133	125	130
Ninjinba	210	196	210	205	130	54	77	87
Urasebaru	255	254	255	255	160	154	151	157

Analysis of variance

Summer				
Source	DF	SS	MS	F
Block	2	680.7	335.4	not sig.
Clone	4	6190.7	1547.7	4.7*
Error	8	2926.5	328.3	
Total	14	9788.0		
Winter				
Source	DF	SS	MS	F
Block	2	980.9	490.5	not sig.
Clone	4	7827.6	1956.9	6.7*
Error	8	2353.2	294.2	
Total	14	11161.6		

* ; significant at 5% level

6. 考察

一般に若い組織は比較的含水率が高い。これは若い組織は細胞膜が薄くて水分に富み、細胞質自体も水分が多いからである。しかし分裂組織の含水率は、細胞の増大がはじまっている組織よりもいくらか低いといわれている。細胞は成熟すると細胞膜は厚くなり、乾物の割合も増加するために、含水率は相対的に低下する。成熟にもとづく含水率の変化はいちじるしく、これは水分の減少によるよりも、乾物の増加による方が大きいかもしれな

い、ACKLEY (1954)によれば、ナシの葉は5月から8月にかけて水分量は増加したにもかかわらず、生重あたりの含水率は73%から59%に低下した。

葉の含水率はクローネの部位、葉令によってもことなり、スギ幼令木ではクローネの周囲程、また梢端程含水率が高かった。飯塚(1959)はビワの葉の水分含量と天気との関係をしらべた。日中はクローネ外部の葉の含水量は内部の葉より多く、天気との関係では、雨の日が最大で、風の日が最低であった。環境との関係については、池田(1963)は砂丘地のクロマツ、ハイネズ等の葉の水分量をしらべ、成長の盛んな7月までは気象とあまり関係なく変化し、7月以降成長に著しい変化をみせない時で、含水量が変化するのを気象因子によると仮定したところ、雨量との間に正の相関がみとめられた。ただし一日前との関係が密接で、5日以前の雨量とは無関係であった。土壤水分との関係は、凋萎点以上では系統的变化はみられなかったが、新葉の含水率は土壤が乾くにつれて低下し、根の含水率は凋萎点の少し上あたりで一時的に高まる傾向があった。このように植物の含水率は、環境因子と関係があることは当然だが、気象因子や土壤水分との相関は、一定限界内においては高いとはいえない。

成熟ともなう含水率の季節的变化は、吸水と蒸散のバランスの季節的な差にもとづいている。Gibbs (1935, 1939, 1958)によると、カナダでは通常、春新葉がでる直前に幹の含水率は最大に達し、夏から落葉期にかけて蒸散量が吸水量を上まわるために低下する。針葉樹の含水率の変動の幅は、広葉樹より小さかった。岡崎(1950, 1960)はスギ、ヒノキの1年生葉と2年生葉の滲透価、含水率、溶質比の季節的变化を比較したが、含水率は春夏に大で、秋から冬にかけて急に低下するが、この現象は1年生枝葉にみられるだけで、2年生枝葉は年中大きな変動を示さなかった。新旧葉の含水率は、冬ではほぼ等しかったが、それまでは1年生枝葉が格段に高かった。この傾向は34年生タイワンスギの1—2年生葉についてもあてはまる³⁰⁾。柴田(1950)は、スギ、ヒノキ、アカマツの葉の含水率を測定したが、スギは5月が最大で以後低くなり、4月が最低になった。ヒノキは9月が最大で4月が最低、アカマツは5月が最大で3月が最低になる。3樹種に共通していえることは、成長のさかんな時期に含水率が高いということで、アヤスギとヤブクグリでの測定値は、あきらかに成長周期との関係を示している。上長成長周期は外山(1954)、塚原(1962)によってまとめられているが、スギ品種の多くは、6月と9月に成長増大期をもっている。したがって葉の含水率の季節的な変化と成長周期とはかなりよく一致した。只木、四手井(1960)が、アキニレの成長ともなう葉の含水率の変化をしらべたところ、葉量の増加期には含水率が高かった。柴田(1950)が、優良地と不良地の葉の含水率をしらべたところ、優良地のスギ1年生葉の含水率は不良地のものより高かった。このように、体内水分と成長との関係はかなりはっきりしているが、現在の段階では定量的な解析は困難である。

II スギの蒸散作用

1. 蒸散量の測定方法

植物の蒸散量を測定するための基本的な原理は、①植物の排出する水蒸気を集めて測定する方法、②水分の消失にもとづく重量の変化を測定する方法、③蒸散作用の過程におい

て消失する水分の代わりに、植物に吸収された水分の量を測定する方法の3種類に大別される。MAXIMOV はこれらの方法を検討して蒸散作用を研究するための唯一の方法は、土壤表面からの蒸発を完全に防ぐように設備したポットで栽培した植物を秤量することだと結論した。ここでは、以下に述べるいくつかの方法による。

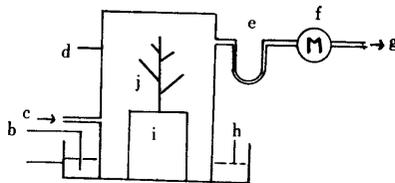
I法、ポリエチレン袋による測定

透明のポリエチレン袋(10×20cm)を葉にかぶせ、蒸散した水蒸気を集めて、蒸散量とする。野外の林木の蒸散量を測定する時、簡便法として、蒸散作用と天候や葉の含水率との関係をしらべるのに用いた。

II法、蒸散箱による測定

ポット全体を透明な容器(Transpiration-chamber)に入れ、通気によって蒸散量を測定する。蒸散箱は通気管、排気管、吸湿用のU字管、流量メーターからなる。吸湿剤はSilica gel, 吸引は水流ポンプによる。気密にするためには、受皿に水を入れ、水面からの蒸発をおさえるために流動パラフィンを浮かべた。蒸散量は、蒸散箱をとおして通気

Fig. 6 Transpiration-chamber used.



- a, Bath (zinc)
- b, Water
- c, Air
- d, Transpiration chamber (polyethylene)
- e, Silica gel
- f, Rota-meter
- g, Water pump
- h, Liquid paraffine
- i, Pot
- j, Seedling

された吸湿剤の重量と蒸散箱をとおさないで通気された吸湿剤の重量との差から計算される。ここでは土壤の乾燥過程における蒸散作用の変化をしらべるのに用いた。

III法、切枝の重量減少による測定

切枝を室内に放置して乾燥させ、一定時間における減少量を蒸散量とした。品種間の比較等サンプルの多い場合に用いた。秤量は感度のよい天秤が必要で、この場合は、コマ以下3桁までの精度の直示天秤による。この方法は、葉の含水率と蒸散作用との関係や、品種間における蒸散作用のちがいをしらべるのに用いた。

IV法、ポトメーターによる吸水量の測定

切枝の蒸散量をポトメーターによって測定する。正確に言えば枝の切口からの吸水量を測定しているのであって、葉面からの真の蒸散量を測定していることにはならないが、近似的に蒸散量とした。この際問題になるのは切枝の蒸散量が時間の経過とともに減少するという点である。しかし減りかたは、はじめ急だが、3日目以降安定した値を示すようになる⁹⁰⁾。そこでデータの整理には3-5日のものを用いた。この方法は、自然状態での気象因子との相関をしらべるのに用いた。

V法、ポットにおける土壤乾燥量による間接的推定

植物は土壤中の水分を吸収して地上部から蒸散する。もし地表面からの蒸発をふせいでおけば、土壤乾燥量は蒸散量とすることができる。したがって一定時間をはきんで土壤含水量の減少をしらべれば、蒸散量を推定することができる。ここでは土壤含水率を直接測

定するかわりに、灌水量と排水量との差を、土壤の乾燥量として蒸散量を推定した。この関係は、 $P=T+D$ で示される。灌水量 (P) は土壤乾燥量 (T) を補い、余剰水を排水 (D) する。土壤面からの蒸発をふせげば、 T は林木の蒸散量になる。そこで土壤面を透明なビニールでカバーして、灌水時にははずすようにした。灌水間隔は10日間で、測定時の土壤含水率は圃場容水量を基準にした。圃場容水量は、一般の定義にしたがって、十分に灌水したのち24—48時間に重力水が完全に排除された状態と考えた。この方法は **Phytotron** での実験に用いた。

VI法、ライシメーター (Lysimeter) による測定

タテ、ヨコ、フカサ各 1 m のコンクリートブロックを東西の方向に一列に 10個並べ、地上に 5cm 残して地中に埋めた。流出量を測定するために北側に幅 60cm の溝を掘り、コンクリートでかためた。ライシメーターにおける蒸散量は降雨量と流出量の差として表わされるが、地表面蒸発を抑えてしまえば、林木のみの蒸散量が得られる。そこで厚めの透明ビニールで地表面をカバーし、周囲を固定し、蒸発をできるだけ少なくするようにした。灌水は、カバーの一端にあるチャックから一定量をジョーロでおこなった。野外の幼木や幼令林から蒸散量を測定するのに用いた。

2. 蒸散作用に影響する環境因子

蒸散作用は、基本的には水の蒸発であり、植物組織からの水の拡散である。このことから、水その他の湿った表面からの蒸発に影響する因子が、蒸散作用にも影響するといえる。これらの因子は、植物の蒸発面と大気との間の水蒸気圧の差に影響するために重要である。**BRIGGS・SHANTZ (1914)** は **Alfalfa** の蒸散作用と、気象因子との相関係数をしらべたが、その結果は、次のようになった。

日照度	0.840±0.009
湿度	0.819±0.11
乾湿球温度差	0.822±0.11
風速	0.485±0.26

可視光線は直接蒸発には影響しないが、気孔の開閉によって蒸散作用に影響する。

ここでは、単一の環境因子としては温度、飽差、土壤水分をとりあげ、総合的な環境因子として天候をとりあげた。

A. 温度との関係

(a) 切枝の場合

方法、材料

蒸散作用の実験方法として、しばしばおこなわれるポトメーターを用いた (**IV法**)。材料は農学部構内に生育する 5—6 年生実生スギの切枝で、1960年 6 月—12 月まで毎月一回実験し、日中 1 時間ごとに温度、湿度の変化とともに吸水量を測定、近似的に蒸散量とした。温度、湿度は 2 点の値を平均し、その時間内の蒸散量と対応させた。くりかえしは 3—4 回であった。

結果、考察

温度の増加は、植物から大気への水蒸気圧の差を大きくするために、植物の蒸散作用を活発にする。温度と蒸散作用の関係をあきらかにするために2次式を仮定して(1)式にまとめた。

$$T = -0.0079 + 0.0014t + 0.0001t^2 \dots\dots\dots(1)$$

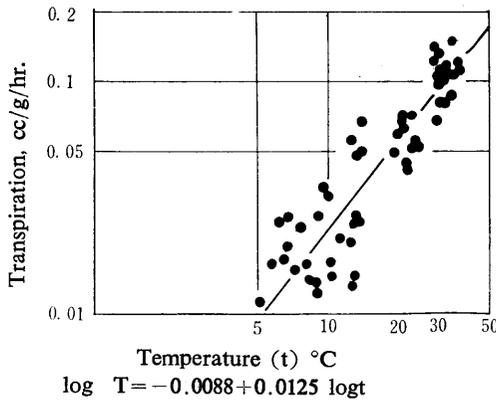
Tは切枝からの蒸散量 cc/g/hr. tは温度°C. 分散分析の結果は、1次の項はあきらかに有意、2次の項も有意であった。

次に、対数関係と仮定すると(2)式が得られた。

$$\log T = -0.0088 + 0.0125 \log t \dots\dots\dots(2)$$

この実験の温度範囲は、5-34°C にわたっているので、生育期におけるスギの蒸散作用

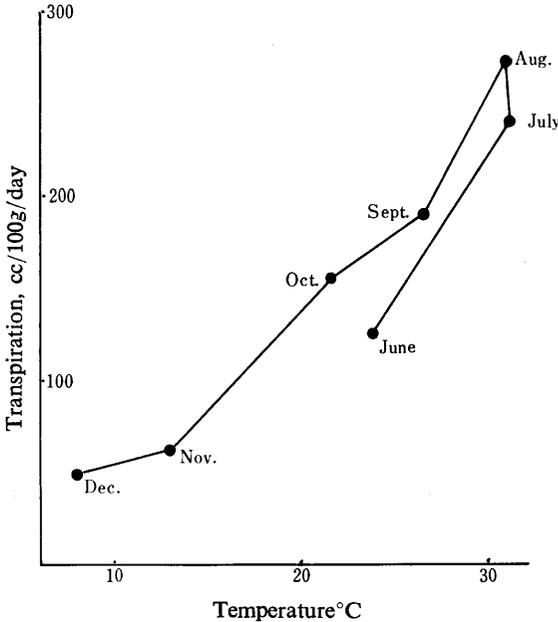
Fig. 7 Relation between transpiration and temperature



Analysis of variance				
Source	DF	SS	MS	F
Temperature	1	6.4132	6.4132	296**
Error	78	1.6873	0.0216	
Total	79	8.1005		

** significant at 1% level

Fig. 8 The climograph relating to transpiration and temperature



と温度との関係は、対数関係がなりたつとみてよい。log T と log t の間の相関係数は 0.89 できわめて有意であった。Fig. 7 によれば、スギの蒸散作用は約 5°C でおこなわれる。

ここでは温度と蒸散作用との関係が、シーズンによって変わらないと仮定して直線化した。しかし、データをくわしく検討してみると、温度の上昇期と下降期では相関のちがうことがわかった。月別の気温と蒸散量をクライモグラフに書いてみると、Fig. 8 になった。同一温度で比較した場合、成長後半の蒸散作用は、前半より活発である。この現象は6月と9-10月、および7月と8月の間にみられた。

これには2つの理由が考えられる。その1は、温度以外の環境因子が、シーズンの前半と後半で影響のしかたがちがう。2は植物の内部状態が温度そのものに対して異った反応を示すからである。

しかし MEYER (1928) は、これと逆の結果を明らかにしている。森林からの蒸散量は同一温度でも5-6月は9-10月より大であった。しかし、とりまとめにあたっては、温度に対する反応は等しいとして直線化している。

$$T=0.087t-3.72$$

Thorntwaite・HOLZMAN (1942) によれば

$$T+E=0.083t-3.35$$

である。T, 蒸散量 (inch) E, 蒸発量 (inch) t, 温度 (F)

蒸散作用がはじまる温度は、T, $T+E=0$ として計算すると、上の2式ともtは5°C前後になり、(1), (2)式とかなりよく一致する。MEYER (1914) は、6°C以下では細胞は活動しないからだと推論した。

ROSER (1932), 山岡 (1956) は直線関係をみとめなかった。ROSER が Lodgepole pine, Engelmann spruce, Douglas fir および Western yellow pine でしらべた結果では、49°Cまでは直線的に変化し、それ以上高温では加速的に増大した。山岡がヤマモモ、スギでしらべた結果は、温度の上昇とともに加速的に増大し、関係湿度の減少につれて曲線全体が上昇した。これらの曲線は、おおむね2ヶ所に彎曲点があり、その位置は大体定まっていた。

(b) 苗木の場合

方法, 材料

アヤスギ苗木をファイトロンで15, 20, 25, 30, 33°Cの温度処理を加え、蒸散作用と温度との関係をしらべた。1963年4月に1/5000ワグナーポットに材料を1本ずつ植え、6-9月に蒸散量を測定した。測定方法はV法により、くりかえしは5回であった。

結果, 考察

6月1日から9月13日までの苗木1本あたりの蒸散量は、定温状態ではTable. 8のようであった。

Table. 8 Transpiration of seedlings under controlled temperature in the Phytotron.

Temperature°C	15	20	25	30	33
Transpiration, cc/seedling	916	1724	2199	3625	3628
Analysis of variance					
Source	DF	SS	ms	F	
Block	4	305204.96	76301.24	not sig.	
Temp.	4	28581584.56	7145396.14	52**	
Error	16	2191718.24	136982.39		
Total	24	31078507.76			

** ; significant at 1% level

分散分析の結果、処理（温度）間にきらかに有意差がみとめられたが、 30°C と 33°C の間には差があるとはいえない。 15°C と 25°C 、および 20°C と 30°C の温度の組み合わせをとりあげてみると、蒸散量は温度が 10°C 上昇すると約2倍になり、 $Q_{10}=2$ の法則がほぼ満足された。ただしここでは個体単位に整理されているから、高温では成長の増大が必ず的に蒸散量を多くしていることになる。

温度と蒸散量との関係を月別に整理すると、次のようになった。1本あたり1日の蒸散量は Table. 9 に、地上部重（生重）1g あたり1日の蒸散量は Table. 10 に示される。

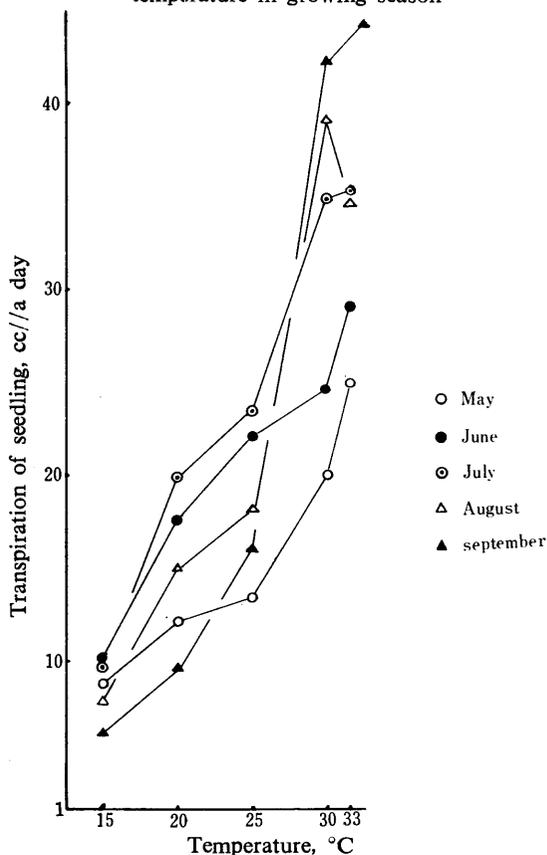
Table.9 Seasonal changes of transpiration of seedling under controlled temperature, cc/day/seedling

Temperature °C	May	June	July	Aug.	Sept.
15	8.8	10.2	9.7	7.8	6.3
20	12.1	17.5	19.7	15.0	9.6
25	13.4	22.1	23.3	18.2	16.1
30	19.9	24.5	34.9	39.4	42.3
33	24.8	29.0	35.4	55.0	44.3

Table.10 Seasonal changes of transpiration per unit weight (fresh, g) of top part of seedling under controlled temperature, cc/day/g.

Temperature °C	May	June	July	Aug.	Sept.
15	0.60	0.69	0.66	0.53	0.43
20	0.74	1.07	1.20	0.92	0.59
25	0.83	1.37	1.45	1.23	1.00
30	0.98	1.21	1.72	1.94	2.08
33	1.45	1.70	2.08	2.06	2.60

Fig. 9 Relation between transpiration and temperature in growing season



5—6月の蒸散量は、温度と比例関係にあることが Fig. 9 からわかる。7月になると 30°C における蒸散作用が活発になり、 33°C にほぼ等しくなる。そして8月になると 33°C での蒸散量は 33°C よりも多くなった。9月では再び比例関係になった。

B. 飽差との関係

方法, 材料

実生スギ1年生葉を材料に、湿度と蒸散作用との関係をしらべた。方法は温度の場合と同一のデータを、湿度を独立変数として整理したものである。湿度は飽差 (Saturation

deficit) に換算した。

結果、考察

切枝の乾重 1 g, 1時間あたりの蒸散量と飽差との関係は, 対数に変換すると直線式がなりたつた。

$$\log T = 0.0003 + 0.0088 \log Hd \dots \dots (3)$$

T ; Transpiration (cc/g/hr) Hd ; Saturation deficit (mmHg)

Analysis of variance

Source	DF	SS	MS	F
Hd	1	4.9996	4.9996	125*
Error	78	3.1008	0.0397	
Total	79	8.1004		

* ; significant at 1% level

相関係数は0.89で, 分散分析の結果, きわめて有意であった。したがって飽差と蒸散作用との間には直線関係がなりたつといえる。

GILTY(1898), DARWIN(1914), STOCKER(1923), MARTIN(1943), BIALOGLOWSKY(1936)は, 相対湿度と蒸散作用との間に直線関係をみとめているが, DANIEL が5種の樹木についておこなった実験では, 直線関係にならなかった。BATE (1923)は, 飽差と蒸散作用との関係を次のように数式化した。

$$T = 235.1 Hd + 28.1$$

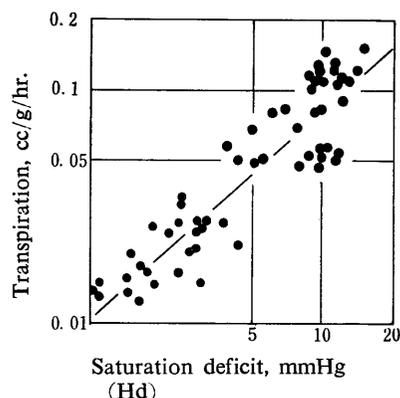
$Hd = 0$ mm Hg の状態でも蒸散作用がみとめられる。DARWIN (1914) が相対湿度 50—80% の間でおこなった実験を統計処理した結果では, 蒸散作用が停止する点は 100% でなく, 105—110%, すなわち大気中の水蒸気が過飽和に達した点であった。金子・辻田 (1962) は, 湿度の影響は樹種によってことなり, ヒノキ, アカマツはスギよりも強く影響されることをみとめた。

C. 土壌水分との関係

土壌水分の適当な供給は, 植物の生理, 成長にとって重要な因子である。しかしながら, 苗畑や林地では土壌含水率は一定でなく, 過剰な状態から過小な状態まで常に変化している。土壌水分が極端に多かたり少なかつたりすると, 植物の正常な生理作用や成長に影響する。HEINICKE・CHILDERS(1936), SNEIDER・CHILDER (1941) は, 土壌含水率が低い場合, リンゴの葉の同化作用と蒸散作用が低下することをみとめた。林木については, 佐藤・名村 (1953) がアカマツのマキツケ苗でしらべた結果, 土が乾くにつれて蒸散能力は減るが, 土の含水率が50—45%になるまでは変化がすくなく, それより乾くと急に低下する。33.5% (凋萎点) では0に近ずき, クチクラ蒸散だけになった。加藤 (1954) はカラマツでし

Fig. 10 Relation between transpiration and saturation deficit

$$\log T = 0.0003 + 0.0088 \log Hd$$



らべ、土壤の乾燥につれて蒸散量が減少し、これによって透過係、含水率を一定に維持していると推論した。岡崎（1950）は和歌山県下産の2年生の実生スギをポットに植栽して土壤含水率を100, 20, 0%に調節した。蒸散量ははじめ100%と20%の間に差がないが、数日後20%の方が活発になった。また100%のものは蒸散量が漸減し、0%では7日目より急速に減少した。佐藤（大）（1957）がスギ、ヒノキ、アカマツのマキツケ苗でしらべたところ、蒸散量は土の含水率が野外容水量と永久凋萎含水率との間のある点にさがるまでは、あまり大きな変化はなく、その点をこえて土が乾くと蒸散量ははげしく減りはじめ、永久凋萎含水率まで乾くと、蒸散量はきわめて少なくなった。

土壤水分を時期的に変化させた場合の蒸散量は、岡崎（1954）の実験によると、スギ、ヒノキ、マツの稚樹を初めは土壤水分を30%に保ち、のち60%に調節すると、はじめから60%に保ったよりも蒸散量は大であった。

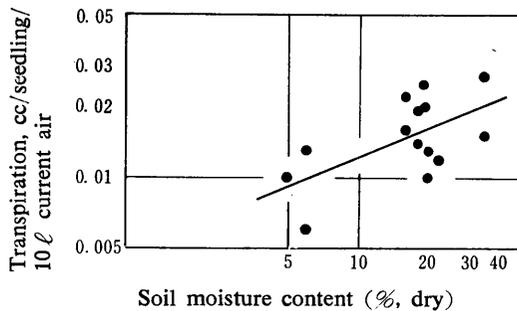
方法, 材料

アヤスギ苗木を1/5000ワグナーポットに1本ずつ植え、土壤水分がいったん飽和したのち自然に乾燥させ、それともなう蒸散量の減少経過をしらべた。測定は蒸散箱に通気して蒸散によって消失した水蒸気をシリカゲルに吸湿させ重さの増加をしらべた（II法）。ポット内の土壤は砂、赤土を5；4に混ぜた。最大容水量は40%であった。

結果, 考察

Fig. 11 Relation between transpiration and soil moisture content.

$$\log T = 0.0068 + 0.0040 \log x$$



1963年7月における土壤含水率と蒸散量の関係は Fig. 11 に示される。

土壤の乾燥が蒸散作用を低下させることはあきらかだが、バラツキがかなり大きい。両対数グラフにプロットすると、

$$\log T = 0.0068 + 0.0040 \log x \dots (4)$$

相関係数は0.60であり高くない。このことは、温度、飽差にくらべて土壤水分の影響は凋萎点以上ではあまり高くないものと考えられる。

C. 天候との関係

天候は総合的な気象因子であって、直接には日照度に、間接には温度、湿度等に影響する。ここでは個々の気象因子を区別しないで、晴、薄曇、曇と単純にして比較することにした。1年生葉に透明のポリエチレン袋をかぶせ、その中にたまった水滴を秤量して蒸散量とした（I法）。測定は1962年8月と1963年2月におこない、午前10時から24時間を測定時間とした。材料はアヤスギ、ホンスギ、メアサ、ニンジンバ、ウラセバル、ヤブクグリ の6品種で、土壤は砂壤土で、測定期間中は適潤状態にたもった。

結果, 考察

成長期と休眠期における蒸散量と天候との関係は Table. 11 に示される。

天候は品種、シーズンにかかわらずスギの蒸散作用に大きな影響を及ぼしていることがわかる。成長期についてみると晴、薄曇の日にはアヤスギ、ヤブクグリの間に有意差があり、晴れた日にアヤスギは1日の乾燥重の170%、ヤブクグりは220%、薄曇の日にはア

Table 11 Relation between transpiration and weather.

Clones	Growing season			Dormant season		
	Fine	Slightly fine	Cloudy	Fine	Slightly fine	Cloudy
Ayasugi	169	102	93	64	47	20
Honsugi	—	—	—	24	18	23
Measa	—	—	—	34	23	12
Ninjinba	—	—	—	56	30	11
Urasebaru	—	—	—	50	28	11
Yabukuguri	222	142	106	60	53	21
F-test	*	*	not sig.	*	not sig.	not sig.

Transpiration, CC/100g/day

* significant

ヤスギは100%、ヤブクグりは140%の水分を蒸散によって消失する。しかし曇の日には、ヤブクグリの蒸散量はアヤスギより多いが統計的に差があるとはいえない。休眠期についてみると、晴れた日には品種間に有意差がみとめられた。6品種のうちでは、アヤスギ、ヤブクグりが多く、メアサ、ホンスギが少なく、ニンジンバ、ウラセバルは中間であった。曇の日には1日に乾燥重の10—20%の水分を蒸散によって消失しているが、品種間に差があるとはいえない。薄曇の日にも品種間に有意差があるとはいえないが、平均値で比較すると、晴れた日と同様ヤブクグリ>アヤスギ>ニンジンバ>メアサ>ウラセバル>ホンスギの順になる。晴れた日と曇の日の較差はニンジンバ、ウラセバルが5倍の差があり、天候の変化に対して敏感である。アヤスギ、ヤブクグリ、メアサは3倍であり、ホンスギはあまり変化しなかった。門田⁴⁶⁾が、夏に測定したクロマツの蒸散量は、快晴の日には1日1.63mm、曇天に1.07mmであった。この関係は、アヤスギによく似ている。

E. 考 察

植物の蒸散作用と気象因子との関係は、BRIGGS, SHANTZ (1914) が ALFALFA, SORGHUM 等を材料に日照度、湿度、乾湿球温度差、風速との間に相関係数を求めて以来、多くの研究者によって数量化されている。環境の作用機構はなかなかむずかしい問題で、簡単な模式の場合から総合要素の場合まで各種の段階がある。また直接的なもの間接的なものがあるが、ここでは直接の場合をとりあげた。単一要素の場合として、温度、飽差、土壤水分を、複合要素の場合として天候をとりあげた。相関係数は、温度との間に0.89、飽差との間に0.89、土壤水分との間に0.60であり、土壤水分との相関は凋萎点以上ではあまり高くなかった。温度と飽差は分散分析で比較するとFの値が温度の方が高い結果を得た。これは温度および飽差を別々に蒸散作用と比較したものだが、両因子を重回帰として解くと(5)式が得られた。

$$\log T = -0.0045 + 0.0061 \log t + 0.0049 \log Hd \dots \dots (5)$$

Analysis of variance

Source	DF	SS	MS	F
Constant	1	36.3788		**
t	1	6.4139		**
Hd	1	0.3998		**
Error	77	1.2869	0.0167	
Total	80	44.4794		

** significant at 1% level

分散分析の結果、温度、飽差ともきわめて有意であることがわかった。

環境解析においては温度、湿度等を単一要素としてあつかっているが、高温は普通相対湿度を低くし、日照度が高いといったように総合的な意味をもつものである。総合的な気象要素としての典型は、天候であろう。しかし天候は数量化しにくい。ここでは晴、薄曇、曇と不連続な単位で蒸散作用との関係をしらべた。蒸散作用は品種によって天候の影響がちがう。晴の日と曇の日の蒸散量の比を求めてみると、夏ではアヤスギ1.8、ヤブクグリ2.0、冬ではウラセバル、ニンジンバ5.0、アヤスギ、ヤブクグリ、メアサ2.8—3.3、ホンスギ1.0で、ホンスギは天候に影響されることが少ないようだ。

晴の日と曇の日の気象の差は、日照度、温度、湿度等にあらわれるが、特に日照度が顕著に影響するようだ。したがって天候に敏感だということは、日照を要求する性質をもっているからと考えられ、鈍感な品種は耐陰性があるとみていいのかもしれない。

天候を単位として分散分析してみると、両シーズン共、曇の日には品種間に差がみとめられなかった。したがって蒸散作用は品種によってちがうといっても、環境条件を無視しては論じられない。例えば曇の日には実験にもちいた6品種間には、平均値にかなりの差があっても、統計的にはあまり意味がないということになる。

3. 蒸発作用に影響する内的因子

植物のもつ形態的、生理的要因は、蒸散作用に影響すると考えられるが、ここでは形態的要因として、葉令、葉位、器官の大きさ、生理的要因として葉の含水率をとりあげ、蒸散作用との相関をしらべた。

一般にいて、林木の蒸散量の範囲は草とあまりちがわない。バラツキが個体間で大きく、一個体の内部でも新、旧葉の蒸散量にはかなりの差があると考えられる。

佐藤(大)(1948)は葉令と蒸散作用との関係について、GUTTENBERG(1907)、MITTMEYER(1931)、BERGEN(1904)、ROUSCHAL(1939)の研究をまとめて、両者の間には一定の傾向はないと結論した。すなわちGUTTENBERGは新葉は旧葉より蒸散量は少ないといい、MITTMEYERは逆の結果をみとめている。BERGENとROUSCHALはある種の植物は新葉の蒸散量が多く、別の種の植物では旧葉の蒸散量が多かった。岡田(1958)によれば、北山台スギの小枝の乾燥(蒸散量)は各品種とも同じ経過をたどっているが、1年生枝、2年生枝で著しくことなり、1年生枝は2年生枝にくらべて含水率が高いのに蒸散量は少かった。

植物の蒸散作用と葉面積、葉の構造、葉の方向、T/R比等との関係については、KRAMMER(1959)、KRAMER. KOZLOWSK(1960)によってまとめられている。もし水分の大部分が

葉から消失されるものであるならば、葉面積の大きい植物は、小さい植物より全体の蒸散量は多い。このことは、たとえ蒸散量が葉面積と完全に比例しないとしても、また同じ種類で葉面積の小さい植物が、大きい植物よりも、単位面積あたりの蒸散量が大きいとしても納得できる。摘葉による葉面積の減少は、全体としての蒸散量を少なくする。しかし残った葉の単位面積あたりの蒸散量はむしろ増加する。このことは葉の根に対する割合が小さくなるために、葉への水分の供給が促進するからと考えられている。

葉の構造が、蒸散作用に影響することもまちがいない。たとえばいろいろな種類の葉を集めて乾燥させると、速さにちがいのあることがわかる。この差は通常表皮層の厚さと関連していると考えられる。葉の大きさや型は蒸散作用に関係する大きな因子である。水分の消失は単位面積でくらべると、蒸散面積の大きいものより小さいものの方が速い。蒸発面に対する吸収面の比は葉面積より重要だといえる。もし吸水が消失にともなわなければ、内部に水分不足がおこり蒸散作用は衰える。病虫害や移植による根の損傷は、吸収面積が減少するために水分不足の原因になる。VEIHMEYER(1928)が、蒸散量と葉面積、枝の伸長量との間の相関係数を計算したところ、0.98と0.998であって、葉面積は蒸散量を推定するのに有効であることをあきらかにした。

葉の含水率の減少が直接蒸散作用を低下させるのか、あるいは気孔閉鎖によって間接的に蒸散作用を低下させるかあきらかではない。例えば、RENNER(1910), LIVINGSTON(1906), LIVINGSTON, BROWN(1912), LLOYD(1912), LAUSHALT(1945)は、はげしい蒸散作用は細胞の含水率を低下させ、その結果蒸散量を少なくするといっているが、GREGORY(1950)等は、蒸散作用が低下する以前に葉の含水率は減少するといっている。

A. 葉令、葉位との関係

方法、材料

切枝乾燥によるIII法と、ポトメーターによるIV法とを併用した。III法はメアサを材料に1年生葉と2年生葉を切り離し、別々に乾燥し蒸散量とした。IV法は1—2年生葉を同時につけた切枝をポトメーターに挿し、蒸散量を測定、最小二乗法によって1—2年生葉の蒸散能力をきめた。またクローネの上部、中部、下部の1年生葉の蒸散能力をしらべた。測定は1963年4月、1962年6—9月である。

結果、考察

4月と6—9月における1—2年生葉の蒸散量は、Table. 12に示される。生長開始以前の蒸散量は葉令によってあまりちがわない。葉令別に切り離して測定した結果では、2年生葉の蒸散量がやや高かった。しかしこの差は統計的にはあまり意味がない。

Table. 12 Transpiration of one and two year leaves

Age of leaves	April	Sept.
1	37cc/100g/day	250cc/100g/day
2	40	120

生長最盛期になると1年生葉の蒸散量は2年生葉にくらべてはるかに高い。6—9月にポトメーターで測定し、1年生葉、2年生葉の蒸散量を最小二乗法によって解くと、結果

は次のようになった。

$$T = -0.3 + 2.5x + 1.2y \dots \dots (6)$$

T ; 蒸散量 (cc/g/day), x ; 1年生葉重, y ; 2年生葉重 (乾重)

Analysis of variance

Source	DF	SS	MS	F
Constant	1	651.07		469**
x (1 year)	1	132.44		95**
y (2 year)	1	37.85		27**
Error	9	12.50	1.39	
Total	12	833.86		

** significant at 1% level

分散分析の結果は、1年生葉、2年生葉とも蒸散作用に関してきわめて有意であった。クローネの上部、中部、下部の1年生葉の蒸散量は Table. 13 に示される。

Table. 13 Transpiration of 1 year leaves on the upper, the middle and the lower parts of crown

Parts of crown	Transpiration
Upper	19.0cc/100g/day
Middle	15.8
Lower	16.7

幼令木では梢頭に近いクローネ上部の1年生葉の蒸散量は、中、下部の1年生葉にくらべてやや高い。しかしこの差はかならずしも有意とはいえない。

クローネ内部での葉の蒸散量のバラツキは葉令、葉位および陰葉、陽葉等の因子に依存すると考えられる。スギ幼令木についての測定結果では、すでにみたように葉令間にかんりの差があり、これはおそらく葉位による差を上まわるものと考えられる。陰葉の蒸散量は一般に陽葉よりも少ないといわれるが、葉令、葉位と結びついた影響と考えられる。

B. 苗木各器官の大きさとの関係

方法, 材料

アヤスギ苗木を1/5000単位ワグナーポットに1本ずつ植え、1963年6月—9月に蒸散量と成長をしらべた。蒸散量はV法により測定した。材料はフェイトロンで15, 25, 30, 33°Cの温度処理を加え、くりかえしは5回おこなった。

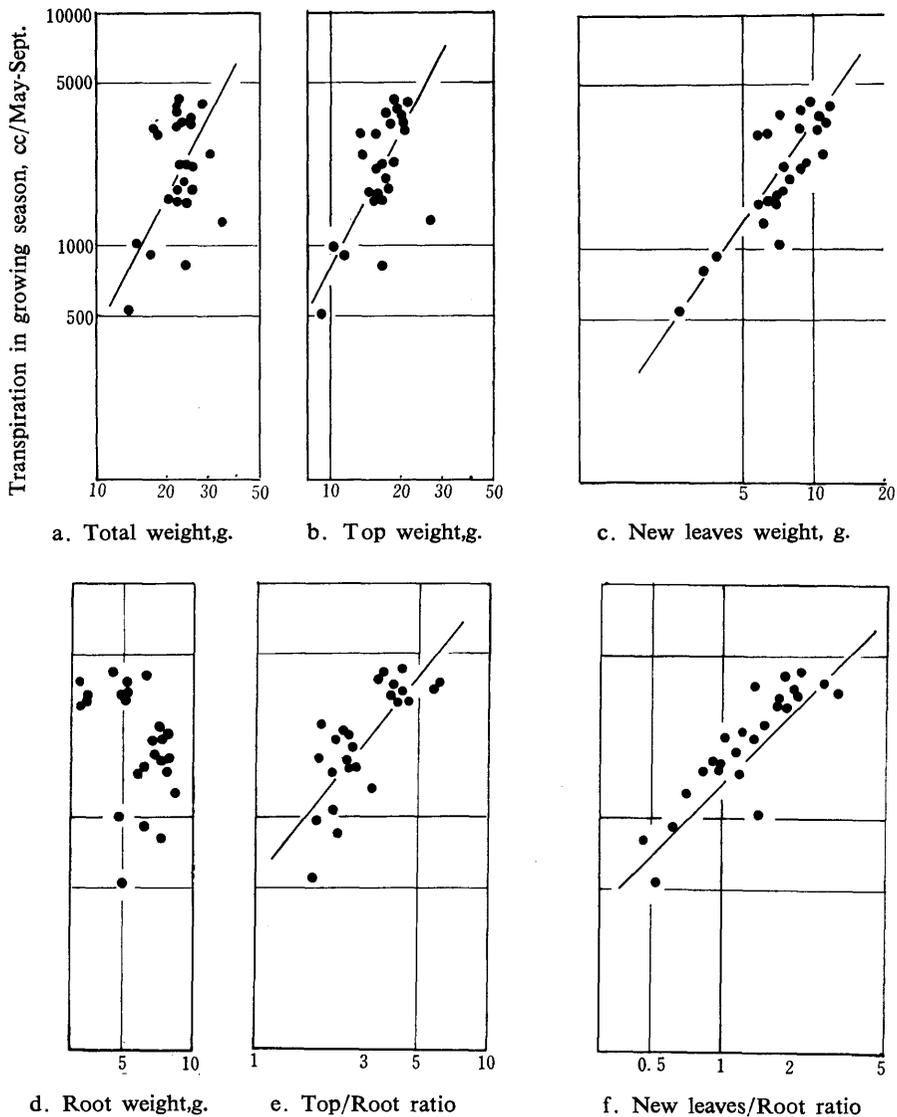
結果, 考察

1963年6月—9月15日までの苗木の蒸散量と器官重及び比の関係は、以下に示される。蒸散量と器官重及び比との間に、対数変換をした場合、直線性がみとめられ、それらの傾向は Table. 14, Fig. 12 に示される。

Table. 14 Regression equations between transpiration and weight of seedlings

Total weight	$\log T = 0.7470 + 1.8962 \log w$ (7)
Top weight	$\log T = 1.0344 + 1.8808 \log w$ (8)
New leaves weight	$\log T = 2.1171 + 1.4075 \log w$ (9)
Root weight	not correlation.
T/R ratio	$\log T = 2.7361 + 1.2595 \log w$ (10)
Leaf/Root ratio	$\log T = 3.1204 + 1.0802 \log w$ (11)

Fig. 12 Relation between transpiration and weight or ratio of seedling.



蒸散量と器官重との間の相関係数は、当年生葉重が0.77で最も高く、地上部重が0.67、

全重が0.55となり、根重との間の相関はみとめられなかった。葉重との間の相関係数がこのように高いのは、葉が蒸散器官だからであろう。葉は物質代謝のうえからは同化器官として、林木の成長に支配的な役割をもっているが、気孔の開閉によって、蒸散器官としての大切な働きをつかさどっていることになる。地上部重との間の相関係数は0.67で、葉重にくらべやや低かった。地上部は葉と幹の和であり、幹が加わることが、相関係数を低くしたと考えられる。このことは、幹からの蒸散は少く、蒸散器官としての機能をあまりもっていないからである。全重との間の相関係数は、さらに低く0.55であった。全重は葉と幹と根の和であり、根が加わることによって、相関係数はさらに低くなった。根は、自身では蒸散器官としての働きは考えられないように、全重との間の相関係数が、葉や地上部重より低くなった。葉、幹、根の蒸散器官としての機能は、葉が最も高く、幹、根は低い。根は吸水器官であるから、直接蒸散作用には関係しないが、葉や地上部重に対する比によって、間接的に影響している。

C. 葉内含水率との関係

方法, 材料

蒸散量はI法及びIII法によって測定した。測定時間は両方とも午前10時から24時間で、測定が終ってから、含水率を求め、蒸散量に対応させた。

実験に用いた材料はアヤスギ、ホンスギ、メアサ、ニンジンバ、ウラセバル、ヤブクグリの幼木で、苗畑に生育している。

結果, 考察

(a) 天候との関係

スギ1年生葉の蒸散作用は、快晴の日には品種によってかなり差のあることがわかった。品種の概念をはずして含水率との関係をしらべると、Fig. 13になる。すなわち含水率と蒸散量を両対数グラフ上にプロットしてみると、直線になることがわかった。最小二乗法によって解かれた回帰式は、Table. 15に示される。

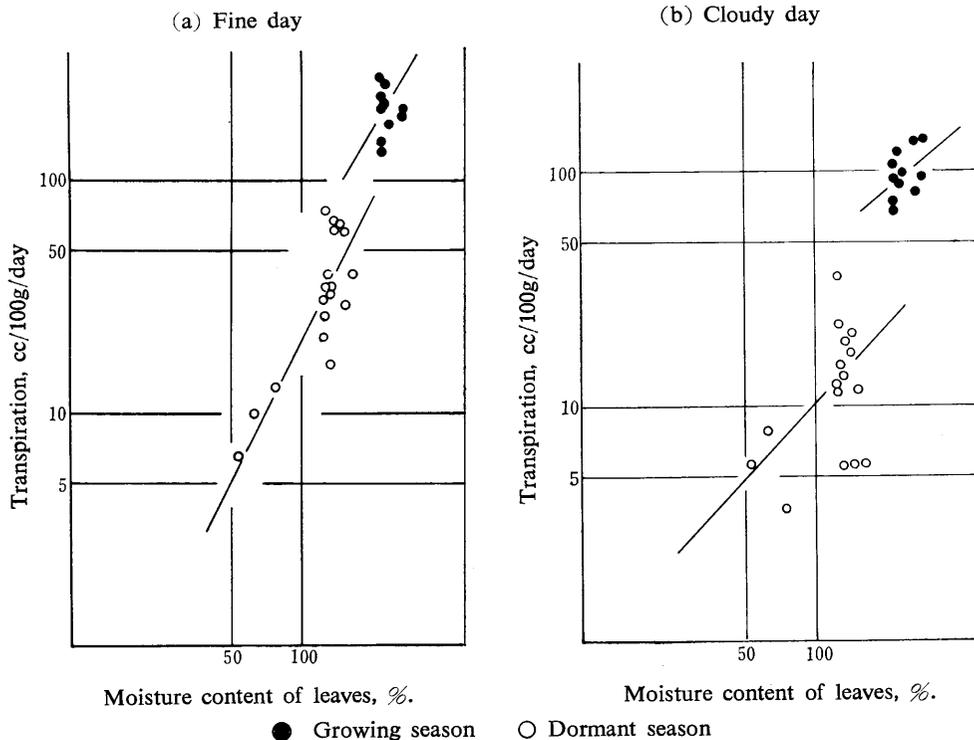
Table. 15 Regression equations between transpiration and leaf moisture content in dormant and growing season.

Dormant season	Fine	$\log T = -2.8560 - 2.0815 \log x$ (12)
	Cloudy	$\log T = -1.1122 + 1.0586 \log x$ (13)
Growing season	Fine	$\log T = -0.5764 + 1.1185 \log x$ (14)
	Cloudy	$\log T = -0.8827 + 0.8827 \log x$ (15)

T ; transpiration cc/100g/day x ; leaf moisture content %(dry)

Fig. 13 (a) は快晴の日、(b) は曇の日の例である。天候、シーズンにかかわらず、含水率と蒸散作用との相関は高いものと考えられる。相関は曇の日より晴れた日に、成長期より休眠期に高かった。休眠期のスギの葉の含水率は、品種、葉令、葉位によってちがうと思われるが、1年生葉に限定してみると、150%の含水率をもつクローネ上部の葉は、晴の日には1日に乾燥重の46%、曇の日には16%の水分を蒸散によって消失していることになる。ただし葉の含水率が低下するにつれて、天候の影響による蒸散量の差は小さくなり、葉の凋萎がすすむにつれて天候とは無関係になる。

Fig. 13 Relation between transpiration and moisture content of leaves.



(b) 葉位との関係

メアサを材料にしてクローネの垂直位置のちがいによる1年生葉の含水率と蒸散作用との関係を、III法でしらべた。1963年3月にしらべた結果は Table. 16, および Fig. 14 に示される。

Table. 16 Regression equations between transpiration and the leaf moisture content of the upper, the middle and the lower parts of crown

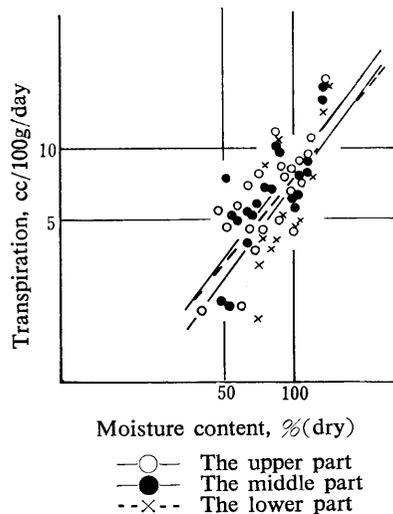
Upper	$\log T = -1.7176 + 1.3164 \log x$ (16)
Middle	$\log T = -1.7156 + 1.2693 \log x$ (17)
Lower	$\log T = -1.7777 + 1.3466 \log x$ (18)

T ; transpiration cc/100g/day

x ; leaf moisture content, %

共分散分析の結果では(16)―(18)式間に有意差があるとはいえない。クローネの位置が葉の含水率や蒸散作用に影響するとしても、両者の相互関係には影響がないようだ。

Fig. 14 Relation between transpiration and moisture content of leaves



(c) 葉令との関係

メアサ 1—2 年生葉の含水率と蒸散作用との関係は、1963 年 4 月の測定では Table. 17, Fig. 15 のようになった。

Fig.15 Relation between transpiration and moisture content of leaves.

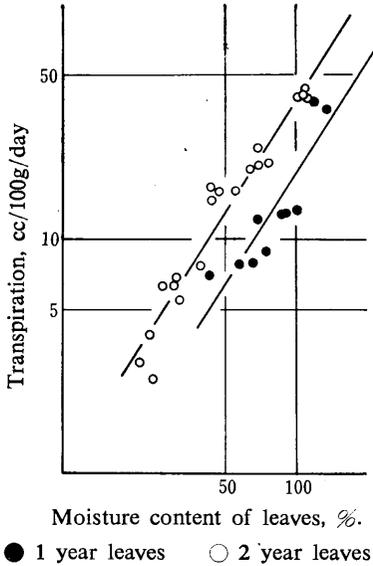


Table. 17 Regression equations between transpiration and moisture content of leaves of 1 or 2 year

1 year leaves	$\log T = -1.9164 + 1.5878 \log x$ (19)
2 year leaves	$\log T = -1.4412 + 1.5089 \log x$ (20)

T, transpiration cc/100g/day
x, moisture content of leaves

共分散分析では、回帰係数には有意差がみとめられなかったが、平均値にはあきらかに差がみとめられた。

(d) 品種によるちがい

アヤスギ、ホンスギ、メアサ、ニンジンバ、ウラセバル、ヤブクグリ 1 年生葉の含水率との関係は、1963 年 3 月の測定では Table.18 および Fig.16 のようになった。

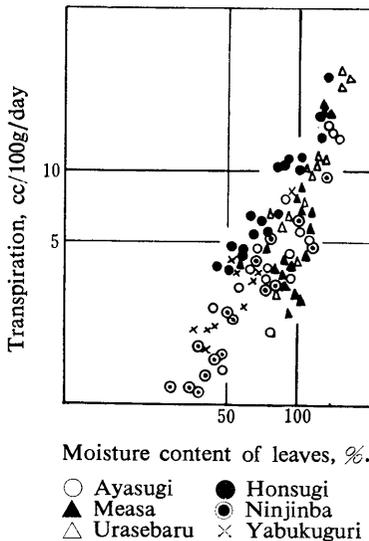
Table. 18 Regression equations between transpiration and moisture content of leaves of several clones

Ayasugi	$\log T = -2.8292 + 1.8333 \log x$ (21)
Honsugi	$\log T = -2.0888 + 1.5662 \log x$ (22)
Heasa	$\log T = -3.8388 + 2.2942 \log x$ (23)
Ninjinba	$\log T = -1.9616 + 1.3537 \log x$ (24)
Urasebaru	$\log T = -4.4151 + 2.6191 \log x$ (25)
Yabukuguri	$\log T = -2.3502 + 1.6320 \log x$ (26)

T, transpiration, cc/100g/day
x, moisture content of leaves (%)

上の 6 式を共分散分析してみると、5 % の水準で回帰係数に有意差がみとめられた。回帰係数の大きさの順に並べてみると、ウラセバル、メアサ、アヤスギ、ヤブクグリ、ホンスギ、ニンジンバとなる。この場合回帰係数の大小は、植物の蒸散作用におよぼす葉の含水率の影響の多少を示すものと考えられるから、品種の水分関係について次のようにいえる。ウラセバル、メアサの蒸散作用は、葉の含水率の変化に対して

Fig.16 Relation between transpiration and moisture content of leaves,



敏感であり、反対にホンスギ、ニンジンバは鈍感であり、アヤスギ、ヤブクグリは中程度に反応するようである。この反応の様式、程度は材木のもついろいろな性質、たとえば

耐乾性や土地要求度とむすびつく可能性がある。このことについて佐藤 (1957) や塚原 (1959) によると、ウラセバル、メアサは土地要求度が高く、ニンジンバは低く、アヤスギ、ヤブクグリ、ホンスギは中位である。すなわちスギの土地要求度は品種によってことなっている。スギ品種間の水分生理のちがいと、土地要求度との関係について、このたびの実験結果から得られた、(21)―(26)式と比較してみると、土地要求度に対する葉の含水率と蒸散作用との間の相互関係の間には、ある程度のつながりがあると考えられる。土地要求度の高いウラセバル、メアサは一定の蒸散作用を維持するためには、葉の中に十分な水分を含んでいることが必要であり、間接的には豊富な土壌水分を要求していると考えられる。土地要求度の低いニンジンバは、葉の水分に対して敏感でないために、土壌水分に対する要求も低いと考えられる。この判定の基準になるのが回帰係数の大ききで、LM-T (Leaf moisture-Transpiration) 係数としておこう。つまり LM-T 係数が大きいものは、土地要求度が高いと推論できる。

4. 葉の乾燥経過

葉の含水率は、吸水と蒸散とのバランスに依存していて、もし吸水が蒸散においつかなければ、含水率は低下し、ついには枯死する。OCHI (1952) は、枯死するまでの時間を耐乾性と考へ、FUKUDA・KAKU (1952) は、葉の乾燥経過の係数 K を、乾燥係数 (drought coefficient) とした。すなわち乾燥が遅ければ、 K も小さく耐乾性があると推論した。

ここでは1本の林木について、葉令、葉位、品種による葉の乾燥をしらべた。

方法、材料

苗畑に生育するアヤスギ、ホンスギ、メアサ、ニンジンバ、ウラセバル、ヤブクグリを材料に、1963年冬と夏にIII法により測定した。得られた数値は絶乾重に対するパーセントになおし、日数との関係を求めた。

結果、考察

A. 葉令との関係

メアサ幼令木のクローネ中部の1年生葉、2年生葉の含水率の減少経過は、1963年4月の測定ではTable.19になった。

Table. 19 Decrease of moisture content of leaves since start of test

Days	1 year leaves		2 year leaves	
	Dry	Fresh	Dry	Fresh
1	57%	128%	52%	109%
2	47	92	40	67
3	44	79	32	47
4	40	67	24	32
5	37	55	20	25
6	34	51	17	22

1 year leaves	$\log Y=2.1703-0.0830 d$ (27)
2 year leaves	$\log Y=2.1102-0.1428 d$ (28)

Y ; Moisture content of leaves, %

d ; Days since start of test

2年生葉の含水率の低下は、1年生葉よりもかなりはやかった。この傾向は、岡田（1858）、岡田・小林（1959）の結果と一致した。

B. 葉位との関係

メアサ幼令木のクローネ上部、中部、下部の1年生葉の乾燥経過は、1963年3月の測定では Table. 20 になった。

Table. 20 Decrease of moisture content of leaves since start of test

Days	Upper part		Middle part		Lower part	
	Dry	Fresh	Dry	Fresh	Dry	Frsh
1	139%	58%	139%	58%	132%	57%
2	120	55	124	55	115	54
3	110	52	115	53	107	52
4	102	51	108	52	101	50
5	96	49	102	50	96	49
6	89	47	95	49	89	47
7	79	44	86	46	80	44
8	73	42	79	44	74	42
9	67	40	74	42	68	40
10	62	38	71	41	63	39
11	58	36	65	39	59	37
12	52	34	60	37	55	35
13	51	33	58	36	53	34

Upper part $\log Y=2.1574-0.0357 d$ (29)

Middle part $\log Y=2.1206-0.0329 d$ (30)

Lower part $\log Y=2.1367-0.0313 d$ (31)

Y ; Moisture content of leaves. d ; Day since start of test

(29)–(31)式は、いずれもよく似ていて、共分散分析の結果では、有意差がみとめられなかった。乾燥係数 d の値は、クローネ上部の葉程大きく、下部の葉にくらべて含水率の低下がいちじるしかった。

C. 品種によるちがい

アヤスギ、ホンスギ、メアサ、ニンジンバ、ウラセバル、ヤブクグリ幼令木の1年生葉の含水率の低下の経過は1963年3月の測定では Table. 21 のようになった。また Fig. 17 に示される。

Table.21 Decrease of moisture content of leaves of clones. (Winter)

Ayasugi	$\log Y=2.1618-0.0570 d$ (32)
Honsugi	$\log Y=2.1407-0.0611 d$ (33)
Measa	$\log Y=2.0926-0.0252 d$ (34)
Ninjinba	$\log Y=2.1417-0.0453 d$ (35)
Urasebaru	$\log Y=2.1935-0.0422 d$ (36)
Yabukuguri	$\log Y=2.1317-0.0549 d$ (37)

Analysis of covariance

Source	DF	SS	MS	F
Within	36	0.0310	0.0008	
Reg. coef.	5	0.0360	0.0072	9**
Common	41	0.0670	0.0016	
Adj. mean	5	0.1300	0.0260	16**
Total	46	0.2640		

** significant at 1% level

共分散分析の結果、回帰係数、修正平均にあきらかに品種間差をみとめた。乾燥係数の大きいものから順にならべると、ホンスギ、アヤスギ、ヤブクグリ、ニンジンバ、ウラセバル、メアサとなった。

1963年7月の測定では Table. 22, Fig. 18のようになった。共分散分析の結果は、回帰係数、修正平均にあきらかに品種間差をみとめた。乾燥係数の大きいものから順にならべると、ホンスギ、ヤブクグリ、ニンジンバ、メアサ、ウラセバル、アヤスギとなった。両シーズンを比較してみると、いずれの品種も夏に大きな値を示しているが、夏の蒸散作用は冬にく

Fig. 17 Decrease of moisture content of leaves since start of test (winter)

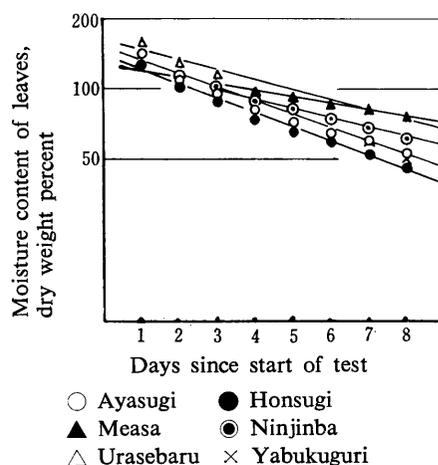


Table.22 Decrease of moisture content of leaves of clones (Summer)

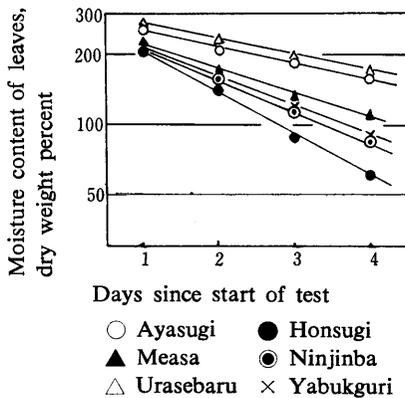
Ayasugi	$\log Y=2.4541-0.0669 d$ (38)
Honsugi	$\log Y=2.4909-0.1780 d$ (39)
Measa	$\log Y=2.4335-0.0990 d$ (40)
Ninjinba	$\log Y=2.4440-0.1277 d$ (41)
Urasebaru	$\log Y=2.4799-0.1454 d$ (42)
Yabukuguri	$\log Y=2.5133-0.1454 d$ (43)

Analysis of covariance

Source	DF	SS	MS	F
Within	12	0.0029	0.0002	
Reg. coef.	5	0.0989	0.0197	98**
Common	17	0.1018	0.0059	
Adj. mean	5	0.1510	0.0302	5**
Total	22	0.2528		

** significant at 1% level

Fig.18 Decrease of moisture content of leaves since start of test, (Summer)



らべて、はるかに活ばつだから当然であろう。ホンスギは両シーズンとも6品種の中では乾燥係数が最も大きく、ウラセバル、メアサは比較的小さい。アヤスギは冬には高い値を示したが、夏には最も低かった。

耐乾性を表示する方法は、いろいろ提案されているが、決定的なものは今のところ知られていない。乾燥係数 d の値は、水分の供給を断った状態での切枝の含水率の低下の経過であるから、低下が著しくないものは、耐乾性があると考えてみた。

しかし、林分調査の結果から分類されたスギ品種の乾性、湿性とは、はっきりとした関

係はみとめられなかった。メアサ、アヤスギは乾性、ホンスギ、ウラセバルは湿性といわれ、乾燥係数 d とはメアサ、ホンスギがあてはまり、アヤスギも夏の結果はあてはまる。しかし土地要求度も高く、湿性と考えられているウラセバルは、乾燥係数が小さかった。

5. 蒸散作用の季節変化

蒸散作用は、植物自体の内部的な要求と、外部からの要求に応じて、同化作用と呼吸作用と同じように季節変化を示す。香山(1942)は、アカマツ、カラマツ、チヨウセンマツ、シベリヤハンノキ、ケヤキ、チヨウセングリの蒸散量の季節変化をしらべたが、その結果針葉樹と広葉樹の間に大きなちがいのあることがわかった。針葉樹は6月に最大値、8—9月に2番目の山があらわれるが、広葉樹は9月に最大値、6月に2番目の山があらわれた。この傾向は、針葉樹の地上部の成長が6月中旬以降急に衰えるのに反して、広葉樹は9月まで成長を継続し、9月中旬に蒸散器官である葉の大きさが極大に達したからだと結論している。金子・辻田(1961)は、造林作業の適期をきめる必要からスギ、ヒノキ、アカマツの吸水量の季節変化をしらべたが、吸水量は気温の最低期に最少値を示し、春に気温の上昇や、根や地上部の成長開始とあいまって急増した。7—8月の気温の最適期に最大になり、その後減少の傾向をたどった。

夏と冬に蒸散によって失われる相対的な水の量は、その年の気象条件によってちがってくると考えられる。RABER(1937)は、氷点下でも水の消失のあることをみとめたが、水

分経済的には 5°C 以下の蒸散作用は、あまり意味がないようであり⁹⁰⁾、MEYER (1928)、THONNTHWAITE・HOLZMAN(1942) そして KITTREDGE (1962) も、こうした考えを支持している。IVANOV (1924)、WEAVER・MOGENSEN (1919) によれば、数種の針葉樹の冬の間の蒸散量は、夏の1パーセント以下だったが、loblolly pine だけは13.5%であった。佐藤 (1958) によれば、冬の間の蒸散量は夏に対してスギ39.6%、ヒノキ36.4%、アカマツ36.6%でかなり高かった。

A. 切枝の場合

方法, 材料

スギ幼令木の1年生葉の蒸散量の季節変化をIII法とIV法で測定した。

結果, 考察

切枝100gあたりの蒸散量はTable. 23に示される。すでにあきらかにしたように、蒸散

Table. 23 Seasonal change of transpiration of cuttings

Month	Transpiration loss	
	cc/100g/hr.	cc/100g/day
Jan.	—	—
Feb.	0.7	17.2
Mar.	—	—
Apr.	1.5	36.8
May	—	—
June	5.2	124.8
July	10.0	240.0
Aug.	11.4	273.6
Sept.	7.9	189.6
Oct.	6.5	156.0
Nov.	2.6	63.1
Dec.	2.0	48.7

作用は温度、飽差との相関がきわめて高く、蒸散作用の季節的变化はこれら2因子に依存している部分が多い。最大の蒸散作用を営む7—8月には、1日に乾葉重の2.4—2.7倍の水分を消失しており、最低の蒸散量を示す2月には、17%であった。冬の夏に対する蒸散量の割合は、6—7%であって、佐藤の数値¹²³⁾にくらべてかなり過小であったが、測定した年や実験室の環境によっては、かなりちがった結果がでてふしぎではない。

B. 苗木の場合

方法, 材料

1963年5—9月にアヤスギ苗木を1/5000単位ワグナーポットに1本ずつ植え、ファイトトロンで蒸散量を測定した。この実験の目的は、植物を一生育期を定温で育てた場合、成長と生理作用が季節変化を示すかどうかを知るためである。温度処理は15, 20, 25, 30, 33°C で、くりかえしは5回おこなった。蒸散量はV法で測定し、約10日間隔に灌水し、

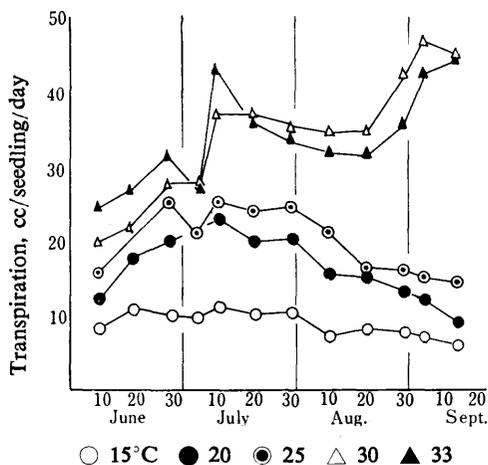
流出量との差から蒸散量を推定した。

結果, 考察

定温状態でアヤスギ苗木が1日に蒸散する量は Fig. 19 に示される。

15°Cでは蒸散量はあまり季節変化をしない。20 25°Cでは6月から7月にかけて蒸散量が増加し、8月以降低下するが、25°Cでは低下が緩慢で、やや横ばい状態を示す。30-

Fig.19 Seasonal change of daily transpiration of seedling



33°Cでは7月前半に1つの山があらわれ、後半から8月にかけて1時おとろえるが、8月下旬から9月にかけて再び増加する。温度との関係を見ると、6月は高温程蒸散量が多いが、7-8月は33°Cが30°Cよりやや低くなる。そして9月に再び33°Cで増加する。高温状態にあらわれた蒸散量の増大期は、7月前半と9月の2回だが、量的にみると9月の方が多い。ここに示された数値は、苗木1本あたりの蒸散量であって、単位重には換算していない。温度は蒸散作用と成長の両方に影響するから、9月における蒸散量の増加は、この時期の成長増大に負うところが大きい。苗木の葉のふえかたをしらべ

たところ、8月以降の高温における増加がめだつた。6月9日-17日の25°Cにおける蒸散量が異常に高かったのは、この時期に機械が故障して30°C以上の高温下におかれたためである。

C. 幼木の場合

方法, 材料

福岡県八女郡のスギ挿木品種キウラボを材料に、幼木の蒸散量を1960年、ライシメータ一によって測定した。1960年4月、Table. 24 に示される材料を1本ずつ植えつけた。

Table. 24 Height and weight of young tree tested

Height, cm.	Weight, g.				
	Total fresh	Root dry	Stem dry	Branch dry	Leaf dry
77	540	83	65	32	150

結果, 考察

1日1本あたりキウラボ幼木の蒸散量を示すと Table. 25 になる。

Table. 25 Transpiration of young tree, Kiurabo (Clone of *Cryptomeria*)

	Early	Middle	Late
June	—	—	335cc/day/tree
July	558	510	665
August	555	630	439

6月是一般に温度もそれ程高くなく、一方湿度はかなり高い。したがって飽差が小さいために蒸散作用はあまり盛んでなく、1日に335ccであった。7月になると晴れの日が多く、高温になるために蒸散量は急に増加し、7—8月を通じての最盛期には、6月のほぼ2倍に達した。8月下旬にはかなり蒸散作用が衰えたが、これは一時的な低温の結果であろう。ただしフアイトロンの実験からあきらかなように、8月における蒸散量の低下は、高温状態でもみられる現象である。

D. 考 察

植物は本来、成長に周期性をもっていて、それはかなり季節の変化に依存しているようだが、人工的な環境においても周期性は持続することがわかった。定温状態に生育する苗木の成長と蒸散作用は、8月に一時的に低下した。この現象は、成長低下については九州地方の多くのスギ品種にみられ、温度や水分からでは完全に説明することはできなかった。このように8月の成長は、環境をコントロールすることによってどこまで増加することができるかきわめて興味深い問題である。

林木の蒸散作用は、気象因子と高い相関があり、主に温度と飽差、副次的には土壤水分等の変動にもなって季節的に変化することが、切枝や苗木をもちいての実験であきらかにされた。

切枝の蒸散量は7—8月に最大値をもつ単純なカーブを描くのに対して、苗木の蒸散量は、フアイトロンで温度を固定して測定した結果、盛夏に一時的な低下がみられた。この現象は、土壤水分が十分な状態でもさけられなかった。スギの成長周期をしらべてみると、同じ時期に成長の停滞がみられる⁸⁹⁾。ただし25°C以下の定温状態では、6—7月や9月の蒸散量が低いために、相対的に谷が消え、山一つの単純なカーブになる⁹²⁾。

ライシメーターでしらべた幼木の蒸散量も8月下旬に低下したが、これは盛夏にあらわれる一時的な蒸散量の低下と考えられるが、この年の低温の結果とも考えられる。

6. 蒸 散 係 数

蒸散係数(transpiration coefficient)は、普通乾物1gを生産するために必要とする水分量であらわされる。したがってこの値を求めるには植物が一生涯、またはある生育期間に使われた水の総量を、その時間内に生産された乾物量で割っている。別に要水量(water requirement)という言葉があるが、蒸散係数と同義語である。また蒸散能率(efficiency of transpiration)とは、蒸散係数と逆の概念であって、一定の水分量によって生産される乾物重を示している。

蒸散係数は、作物ではかなり実験され、環境との関係もあきらかにされているが、林木に関してはあまりわかってはいない。平田・神保(1928, 1932)によれば、スギ555—699, ヒノキ410—795, アカマツ1089—2092, 香山(1942)によれば、チヨウセングリ260, カ

ラマツ225, チヨウセンカラマツ 222, ケヤキ 221, アカマツ194, シベリヤハンノキ182, 芝本 (1941) によれば, スギ400, ヒノキ350であった。蒸散係数は, 蒸散作用と成長の相互に関係した概念であるから, 体的, 体的条件によって影響されると考えられる。しかしながら, こうした点については, 林木ではほとんどわかっていない。温度と蒸散係数との関係は BRIGGS・SHANTZ (1914) が, 冷室, 温室で作物を栽培したところ, 冷地性作物は温室での蒸散係数が高く, 暖地性作物は逆に冷室での蒸散係数が高かった。

ここではファイトトロンで, 15, 20, 25, 30, 33°C の温度条件で, アヤスギ苗木の蒸散係数をしらべた。

方法, 材料

ファイトトロンで, 15, 20, 25, 30, 33°C の温度処理をして, V法により蒸散量を測定し, 蒸散係数を求めた。

結果, 考察

各種の温度処理によって測定された蒸散係数は Table. 26 に示される。

Table. 26 Transpiration coefficient under controlled temperature.

Temperature °C	15	20	25	30	33
Transpiration coefficient	533	523	511	656	991

Analysis of variance

Source	DF	SS	MS	F
Repeat	4	79208	19802	2.3
Temperature	4	825059	206264	24.3**
Error	16	135390	8461	
Total	24	1039657		

** significant at 1% level

分散分析の結果は, きわめて高い有意差があり, このことから温度状態が蒸散係数にかなり影響していると考えられる。すなわち, 15, 20, 25°C では約 500 で, 処理間に差はみとめられないが, 30, 33°C との間にはかなりちがいがあ。特に 33°C は 991 ときわめて高い値を示した。このことは成長が 25°C を最適温として高温ではおとろえるのに反して, 蒸散量は高温程大きいためである。水分経済的にみると適温では水分を有効に使い, 適温からはなれるにつれて無効な水が多くなる。つまりこうした状態では水の消費量が高まっても物質生産はあまり増加しない。この関係を横式的に表わせれば, 適温を最低とする凹型のカーブを描くことになる。低温の蒸散係数は高温より低い。ただし低温では成長自体が悪いから, 水分経済的には良好でも, 物質生産的にはあまり好ましくない。高温で蒸散係数がこのように大きくなるのは, 成長量の増加以上に蒸散量が増大するためである。高温での蒸散作用は, 葉温を冷却する作用と呼吸作用による蒸散量の増大とがともなっていると考えられる。

蒸散係数を決定する 2つの因子, すなわち蒸散作用も成長量も季節的に変化する。とす

ると両者の比として示される蒸散係数が、季節的に変化することは当然であろう。ここでは時期別の乾物生産量が直接測定できないので、月別の針葉の総伸長量に、単位長あたりの乾重をかけて乾物生産量とした。月別の乾物生産量、蒸散量、蒸散係数を示すと Table. 27 のようになった。

15°Cでは、蒸散係数は5月が最低で、時の経過につれて大きくなる。20°Cでは6月に谷をもつ凹カーブで9月が最高である。15-20°Cでは、9月にはいとほとんど生長しな

Table. 27 Monthly changes of transpiration coefficient under controlled temperature

		May	June	July	Aug.	Sept.
15°C	Dry matter produced, g	0.98	1.04	0.58	0.19	0.02
	Water transpired, cc	272	306	300	241	63
	Transpiration coef.	277	294	517	1268	3150
20°C	Dry matter produced, g	0.96	1.83	1.17	0.32	0.73
	Water transpired, cc	375	525	610	465	96
	Transpiration coef.	391	286	521	1453	480
25°C	Dry matter produced, g	1.06	1.80	1.10	0.41	0.73
	Water transpired, cc	415	663	722	564	209
	Transpiration coef.	391	368	656	1375	286
30°C	Dry matter produced, g	0.64	1.43	1.33	2.23	0.69
	Water transpired, cc	616	735	1081	1221	549
	Transpiration coef.	962	513	812	547	795
33°C	Dry matter produced, g	0.71	1.05	0.66	1.18	0.89
	Water transpired, cc	768	870	1100	1085	575
	Transpiration coef.	1081	828	1666	919	646

いたために非常に大きな値を示している。25°Cでは20°Cによく似ているが、9月の蒸散係数が小さくなる点がことなっている。30°Cでは1月ごとに増減をくりかえすジグザグカーブを描き、33°Cでは、30°Cに似ているが9月に低くなる点がことなっている。

月別にみると5-7月は高温程蒸散係数が高くなっているが、8-9月は温度との間に一定の傾向をみとめることはできなかった。

Ⅲ. 土壌水分とスキ幼時の生長

土壌水分は、植物の水分のバランスに影響することによって、しばしば成長に関して制限因子になる。土壌水分と成長との関係については定説はない。理論的には、土壌水分のごくわずかの増減も成長に影響することになるが、VEIHMEYER(1927)によれば、圃場容水量から永久凋萎点までは成長にとって等しく有効であり、一方RICHARDS・WADLEIGH(1952)によれば、土壌水分が永久凋萎点に達する以前に、植物の成長はおとろえる。ローゼ¹¹⁰⁾は植物にとって最適な含水量の下限を「生長遅延含水量」とよんだ。この点は圃場容水量のほぼ70%にあたっている。最適含水量の上限は圃場容水量より若干高いところにあり、さらに含水量が増加すると、水の利用性は高まるが、通気性の減少と根に対する酸素の供給不足のために、植物の生活条件は悪化しはじめる。

土壤が乾燥した場合の成長抑制は、マクシモフ⁷⁹⁾によれば、土壤水分が不足すると葉に水分を供給することが困難になり、その結果、葉の含水率は減少する。葉の含水率が減少すれば、気孔は閉じてしまい、そのため蒸散作用も同化作用も低下する。蒸散作用の低下は根系の溶液吸収を、同化作用の低下は物質生産を困難にさせ、成長が衰えることになる。パバダキス¹⁰⁵⁾によれば、成長点は含みうる水分をほとんど全部含むときだけ成長し、すこしでも乾くと成長が阻止される。その結果、土壤が乾燥した時は、乾きにさらされやすい器官の成長を犠牲にしても、根、葉の成長は都合よくおこなわれるようになる。この現象は水分に対する植物の器官の間の競争関係として理解される。植物内部に水分不足がおこるときは、器官や組織の間に水分に対する競争がおこる。植物体内での水の動きは拡散圧差(DPD)が大きい程速い。もし湿った土壤に生育する植物が、水蒸気で飽和した大気にかこまれていれば、細胞の膨圧は充分で内部に起る水の移動は実際には止まってしまう。しかしこうした状態はほとんど存在しない。乾燥土壤程、水分に対する競争がはげしく、DPDの高い器官、組織は、DPDの低い器官、組織を犠牲にして水を得ようとする。若い葉は通常古い葉を犠牲にして水を得る。そこで乾燥にありと古い葉から枯死することになる。

スギの成長と土壤水分との関係については多くの報告があり、なかもで大内・八木下(1943)、木梨(1960)、真下(1961)は、土壤水分に関与するいくつかの因子との相関を、実験的に、統計的にあきらかにした。大内・八木下(1943)によれば、秋田杉の樹高成長と腐植層の厚さ、含水量との相関係数は、それぞれ0.56および0.86であった。木梨(1960)は九州地方のスギ林の調査から、A層の厚さ、B層の水分当量と樹高との間に重回帰式を求めた。真下(1961)は透水係数が樹高の判定に有効なことをあきらかにした。

佐藤(1957)によれば、アヤスギは耐乾性があり、土壤水分の高い所にも耐えられる品種で、ヤブクグリは水分の多い川沿いで成長がよく、空中湿度も要求する品種である。熊本県小国地方はアヤスギ、ヤブクグリの林業地として知られているが、この地方では乾燥地にアヤスギ、湿潤地にヤブクグリを植栽して成功している⁴²⁾。スギ幼時の成長と土壤水分との関係については、報告されているが、多くは現地調査の結果であり、圃場、ポット等で水分のみを処理した実験は少ない。現地調査では、土壤水分に付随する様々な因子(土壤の厚さ、土壤空気、土性等)を区別して解析することは困難である。小野(1957)によれば、アヤスギ、ヤブクグリの成長は、土壤型がB_B→B_D→B_Bと悪くなるにつれて成長も衰えるが、アヤスギの方が極端に悪くなった。このことからアヤスギの方がヤブクグリより土地要求度が高いと推論される。下野園・長友(1962)によれば、アヤスギ、クモトオシ幼時の成長は、土壤の乾燥状態によって、かなり差があり、その差は樹令とともに大きくなった。器官の配分割合は、アヤスギは湿潤地では葉の割合が1年から5年まで変わらないが、幹、枝の割合は樹令にともなって増加し、反対に根の割合は減少した。乾燥地では、根の割合は変わらないで、葉が少なくなり、幹枝の割合が漸増した。

ここでは **Lysimeter** に、アヤスギ、ヤブクグリを植栽して、土壤水分との関係を1961—1963年にわたってしらべた。

方 法, 材 料

Lysimeter は本来水の滲透や蒸通発の測定にもちいられている。ここでは林木の水分生

理, 特に土壤水分と成長との関係をしらべるのに用いた. 大きさはタテ, ヨコ, フカサがそれぞれ1mのコンクリートのブロック10コを東西の方向に一列に並べた. 各ブロックは底に排水孔をもち, 流出量の測定もできる. 土壤水分のコントロールは灌水により, 自然の降雨は1.8mの高さに, タキロン製の屋根をつけて遮断した. 土壤は, 森林土壤のタイプにあわせて, 黒土をA層に, 赤土をB層にした. A層の厚さは, 15, 30, 45cmの3回くりかえしてであった. 土壤の水分常数は遠心分離法では次のようである.

Table. 28 Soil moisture content

	A-horizon	B-horizon
Maximum moisture capacity	49%	43%
Field moisture capacity	23	16
Wilting point	7	6

土壤水分の処理方法は1961年と1962—63年では目的を多少異にしている. 1961年は自然の降水に灌水を組み合せ, **Dry**区は降雨のみ, **Moist**区は無降雨日が続いた場合にのみ灌水, **Wet**区は常に灌水した.

1962—63年の処理方法は, **Wet**区は幼令林の蒸通発量に相当する雨量(100mm/月)を灌水し, **Moist**区は1/2, **Dry**区は更に1/2程度の灌水を基準にした. 土壤含水率は**Wet**区30%, **Mois**大区20%, **Dry**区10%である.

Table. 29 Meteorological characters in Fukuoka city

1961	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Year
Temperature, °C	4.4	5.4	10.2	14.4	19.0	22.8	28.3	28.1	25.4	19.7	13.8	8.2	16.6
Humidity, %	66	64	70	74	75	74	78	79	75	72	72	68	72
Precipitation, mm	50	45	121	98	153	92	160	140	212	260	68	55	1454
1962													
Temperature, °C	4.7	6.7	9.0	13.2	18.1	21.2	26.7	27.1	23.7	17.4	12.2	8.4	15.7
Humidity, %	68	68	64	69	71	80	81	79	76	72	74	73	73
Precipitation, mm.	116	45	43	82	135	209	451	158	161	116	132	96	1743
1963													
Temperature, °C	2.6	3.5	8.7	14.3	19.1	22.0	27.0	27.0	22.6	16.6			
Humidity, %	67	69	71	75	84	85	77	79	75	74			
Precipitation, mm	121	60	84	170	496	504	222	319	114	74			

Table. 30 Depth of water supplied to the Lysimeter in 1963.

	May	June	July	Aug.	Sept.
Wet soil	114mm	130mm	115mm	120mm	50mm
Moist soil	52	48	50	50	20
Dry soil	26	24	25	20	10

実験に用いた材料は, 九大粕屋演習林のアヤスギ, ヤブクグリを母樹に, 1959年挿し付けた挿木のうちからえらんで, 1961年2月ライシメーターに移植した. 植栽本数は8本/

m²で、アヤスギ、ヤブクグリを4本ずつ、1ブロックに混植した。材料の大きさは Table. 31 に示され、分散分析の結果は有意差が認められなかった。

Table. 31 Height and diameter at the ground level of seedlings used, February 1961

	Ayasugi			Yabukuguri		
	Wet	Moist	Dry	Wet	Moist	Dry
Height, cm.	42	41	43	47	48	46
Diameter at the ground level, mm.	8.3	8.9	8.5	9.5	10.1	9.2

結果, 考察

1. 地温との関係

1963年4月と8月に Wet区と Dry区で測定した地温は、Table. 32 に示される。測定の深さは 0, 10, 20, 30cm である。

Table. 32 Soil temperature in wet and dry soil, 1963

Depth	April		August	
	Wet	Dry	Wet	Dry
0cm	18.0°C	19.4°C	29.1°C	30.6°C
10	14.8	15.2	28.1	28.8
20	14.6	14.9	28.1	28.8
30	15.2	15.3	28.5	28.9

土壤温度は基本的には受熱と放熱のバランスによってきまる。受熱は直接間接に太陽輻射の結果であり、理論的には植生の存在が地表面に達する輻射エネルギーを減少させることになる。地表面に到達した輻射エネルギーも、土性によって比熱がちがうために、地温もことなる。水は比熱が高いために、土壤水分の多少が土壤の比熱に影響し、間接的に地温に影響する。砂の比熱は水で飽和した場合は 0.72, 50% 飽和した場合は 0.51, 乾燥した場合は 0.30 である。有機質の比熱は水で飽和した場合 0.90, 50% 飽和した場合 0.53, 乾燥した場合は 0.15 である⁵⁹⁾。

地表面は直接大気に接しているため、土壤の乾湿によって春に 1.4°C, 夏に 1.5°C の較差があった。しかし地中温度はあまりちがわない。10-20cmの深さで 0.7°C 程度であり、それより深くなると較差はさらに小さくなると考えられる。Fraser¹⁸⁾ は湿った土地では地温の上昇をさまたげるために、春の成長開始が遅れることをみとめたが、アヤスギ、ヤブクグリにはそのようなことはみられなかった。

2. 成長との関係

1961—63年におけるアヤスギ、ヤブクグリの生長は、Table. 33 に示される。

土壤水分とスギ幼時の成長を、成長率で示すと Table. 34 になる。上長成長では、1961年はあきらかに Dry区が、Wet区、Moist区より悪いが、アヤスギではWet区とMoist区の間に差がみとめられない。1962—63年は処理間に有意差があるとはいえない。肥大成長では、1961年は Wet区 < Moist区 < Dry区となり、1962年—63年は、Wet区の成長は Dry

Table. 33 Growth of young trees in wet, moist and dry soil.

Height,	cm	Ayasugi			Yabukuguri		
		Wet	Moist	Dry	Wet	Moist	Dry
1961	75	74	69	83	83	77	
1962	110	103	103	125	121	118	
1963	137	127	128	159	148	148	
Diameter at the ground level, mm							
1961	13.3	14.2	14.0	13.1	14.4	13.8	
1962	17.8	17.8	17.9	16.9	16.9	17.1	
1963	21.0	18.7	19.3	21.3	18.6	18.6	
Weight of total leaves, g							
1962	778	644	632	352	415	363	
1963	609	585	637	704	539	509	
Weight of one year leaves							
1962	544	396	398	252	284	234	
1963	345	313	354	383	264	221	
Weight of stem, g							
1962	139	116	129	107	118	114	
1963	200	181	169	274	199	187	
Weight of root, g							
1962	176	142	134	125	138	121	
1963	131	131	99	136	109	98	

Table. 34 Growth ratio of young trees in wet, moist and dry soil

Height		Ayasugi			Yabukuguri		
		Wet	Moist	Dry	Wet	Moist	Dry
1961	78%	80%	60%	77%	73%	63%	
1962	47	37	48	51	46	53	
1963	25	23	24	28	23	25	
Diameter at the ground level							
1961	58	60	64	38	43	50	
1962	30	26	28	29	18	24	
1963	18	5	8	26	10	9	
Weight of leaves (new leaves/old leaves)							
1962	231	160	168	252	216	180	
1963	137	117	123	89	96	77	

区よりもよい結果をえた。1961年の処理方法は、自然降水量による処理を Dry区とし、灌水量を増すごとに Moist区、Wet区となっており、Table.29に示される降水量では、上長成長に充分ではなかった。しかし肥大成長は Wet区が悪く、灌水量の増加はマイナスの影響を示した。1962—63年の灌水量は、Wet区で月に110 130mmで、これは幼令林の蒸散発量をやや上まわると考えられる量だが、この程度では上長成長に充分とはいえなかった。

スギの成長に重要だと考えられる⁸⁸⁾⁸⁹⁾1961年の月雨量は、5月154mm、6月92mmで、5月は平年並だが、6月は平年にはるかに及ばず、いわゆるカラツユで、灌水の効果があきらかにあらわれた。3ヶ年の結果をとりまとめてみると、5-6月の雨量が、250mm前後以下では、成長との関係はあきらかでなく、それ以上では、降雨量が増し、土壤水分が高まるにつれて、上長成長はさかんになるといえる。一方肥大成長は、同じ時期の降雨量が250mm前後の時に最もよく、それ以下でも、以上でも生長がおとろえるという結果が得られた。葉重は、5-6月雨量が250mm以下でも生長に影響するようである。上長成長には、土壤水分はかなり多くてもいいが、肥大成長には、むしろ害がみられた。これは呼吸に必要な酸素の不足と考えられる。

3. 相対成長との関係

A. 林木各器官の配分割合

若い組織は、古い組織にくらべて、水分に対する要求が高いために、全体の重さのなかで占める器官の割合がことなってくる。1962年の成長終了時(2年生)の器官重の配分割合は、Table. 35に示される。

Table. 35 Proportion of weight of several parts of young trees

		New leaves	Old leaves	Stem	Root	Total
Ayasugi	Wet	42.2%	15.9%	21.6%	20.3%	100%
	Moist	40.8	18.2	21.8	19.2	100
	Dry	37.5	21.1	21.9	19.5	100
Yabukuguri	Wet	41.4	21.6	21.0	16.0	100
	Moist	41.2	25.3	18.6	14.9	100
	Dry	41.5	22.9	21.2	14.4	100

新葉は1年生葉、旧葉はそれ以上の年令の葉として取扱った。アヤスギは、土壤が乾燥すると葉の成長が相対的に悪く、1年生葉の占める割合がWet区42.2%から、Dry区37.5%に減少した。逆に旧葉の割合は15.9%から21.1%に増加した。枝と幹の割合は21.6%から21.9%にふえたが大きな差ではない。根の割合も20.3%から19.5%に減少したが有意な差ではない。ヤブクグリは、新葉、旧葉、枝、幹ともあまり変わらないで、根の割合が16.0%から14.4%に減少しただけである。

B. 形状比, T/R比

形状比は林木の幹の形質を表わすものだが、林木の形状比, T/R比と土壤水分との関係を示すと、Table. 36になる。土壤水分は肥大成長よりも上長成長に強く影響する。したが

Table. 36 H/D ratio and T/R ratio of young trees in wet, moist and dry soil

	Ayasugi			Yabukuguri		
	Wet	Moist	Dry	Wet	Moist	Dry
H/D ratio	63.6	59.1	58.6	73.9	72.3	69.2
T/R ratio	5.4	5.8	6.4	3.9	3.9	4.3

って土壌含水率が高まるにつれて、形状比が大になり、乾燥地では小さくなる。ただし統計的には、土壌水分による形状比のちがいは、5%水準で有意差がみとめられたにすぎなかった。T/R比は、土壌が乾いている程大きくなる。

C. 葉量と他の器官の成長との関係

同化器官としての葉量の多少は、当年や翌年の成長に影響するといわれているが、こうした関係が、土壌水分によって変わってくるかどうか、しらべてみた。葉量と幹重、根元直径との間の相関係数は、Table-37に示される。葉量と樹高との間の相関係数は統計的にみとめられなかった。一般に相関係数は、湿潤土よりも乾燥土の方が高いようであり、乾燥

Table 37 Correlation coefficients between leaf weight and stem weight or diameter at the ground level

	Ayasugi				Yabukuguri			
	Leaf ; Diameter 1962	Diameter 1963	Leaf; Stem 1962	Stem 1963	Leaf; Diameter 1962	Diameter 1963	Leaf ; Stem 1962	Stem 1963
Wet	0.92**	0.88**	0.75*	0.75*	0.80*	0.93**	—	0.87**
Moist	0.92**	—	0.94**	0.93**	—	0.98**	—	0.99**
Dry	0.93**	0.91**	0.98**	0.92**	—	0.98**	0.84*	0.98**

** ; significant at the 1% level * ; significant at the 5% level

土壌では、葉の量の多少が、幹の重さや根元直径に大きく影響していることになる。ただしアヤスギでは、 $r(l, d)$ が Moist 区で、ヤブクグリの $r(l, d)$ が Moist-Dry 区で相関関係がなりたたなかった。葉重 ($W_{L,g}$) と幹重 ($W_{S,g}$)、根元直径 (D_{mm}) との間の相対生長式は、次のようになった。

Ayasugi

$W_L ; W_S$

$$1962 \text{ wet } W_S = 0.06W_L + 96 \quad (44)$$

$$\text{Moist } W_S = 0.12W_L + 43 \quad (45)$$

$$\text{Dty } W_S = 0.16W_L + 27 \quad (45)$$

$$1963 \text{ Wet } W_S = 0.18W_L + 92 \quad (47)$$

$$\text{Moist } W_S = 0.19W_L + 68 \quad (48)$$

$$\text{Dry } W_S = 0.16W_L + 68 \quad (49)$$

$W_L ; D$

$$1962 \text{ Wet } D = 0.013W_L + 11.0 \quad (50)$$

$$\text{Moist } D = 0.011W_L + 11.9 \quad (51)$$

$$\text{Dry } D = 0.012W_L + 11.5 \quad (52)$$

$$1963 \text{ Wet } D = 0.018W_L + 7.5 \quad (53)$$

$$\text{Moist } \text{—————}$$

$$\text{Dry } D = 0.025W_L + 17.2 \quad (54)$$

Yabukuguri

$W_L ; W_S$

1962	Wet	_____	
	Moist	_____	
	Dry		$W_S = 0.25W_L + 27$ (55)

1963	Wet		$W_S = 0.32W_L + 45$ (56)
------	-----	--	---------------------------

	Moist		$W_S = 0.36W_L + 5$ (57)
--	-------	--	--------------------------

	Dry		$W_S = 0.39W_L + 11$ (58)
--	-----	--	---------------------------

 $W_L ; D$

1962	Wet	_____	$D = 0.016W_L + 11.0$ (59)
------	-----	-------	----------------------------

	Moist	_____	
--	-------	-------	--

	Dry	_____	
--	-----	-------	--

1963	Wet		$D = 0.015W_L + 10.9$ (60)
------	-----	--	----------------------------

	Moist		$D = 0.012W_L + 12.2$ (61)
--	-------	--	----------------------------

	Dry		$D = 0.012W_L + 12.7$ (62)
--	-----	--	----------------------------

土壤水分の相対成長に対する影響は、この実験の範囲内では、あまりはっきりしたことはいえない。葉の単位重あたりの幹の生産能力は、上にあげた相対成長式から判断すると、1963年のアヤスギを除けば、土壤が乾いている方が高いといえる。1962年のアヤスギの成長を例にとると、Wet区で葉量1kgあたり60gの幹を生産し、Moist区では120g、Dry区では160g生産することになる。1963年のヤブクグリでは、Wet区320g、Moist区、360g、Dry区390gとなっている。肥大成長に関しては、一定の傾向をつかむことはむずかしい。ヤブクグリでは、単位葉量のもつ肥大成長能力は、Wet区の方が高いようだ。

4. 上長成長周期に及ぼす影響

林木の成長は、いろいろな生理的プロセスからなっていて、それぞれのプロセスの量は月によってことになっている。そして月における各プロセスの量のバランスや環境の変化の結果として、林木は季節的に成長の周期をもつことになる。苗木の上長成長の周期に関して、坂口¹⁴⁾は樹種によって2つの型に分類した。その一の型は、スギ、ヒノキ、サワラ、ヒバ、カラマツが属するもので、春から5—6月にかけて成長旺盛期を経過し、夏に一時おとろえ、秋に再び成長をはじめ、漸次温度の低下にともなって生長がおとろえ、休眠期にはいる。その二の型は、マツ、モミ、トウヒが属するもので、5—6月まで急速に伸長し、後期はほとんど伸長しないで、秋にはいると硬化し、冬芽を形成する。スギにおいても品種によって成長周期にちがいのあることを外山(1954)、塚原(1962)があきらかにしている。こうした成長周期は品種によってかなり安定したものと考えられるが、環境によってことになってくるのが予想される。

ここでは環境因子として土壤水分が、どのように影響するかをしらべてみた。

方法、材料

2年生アヤスギ、ヤブクグリをライシメーターに植栽したもので、処理方法、成長結果

等は前節と同様である。

結果, 考察

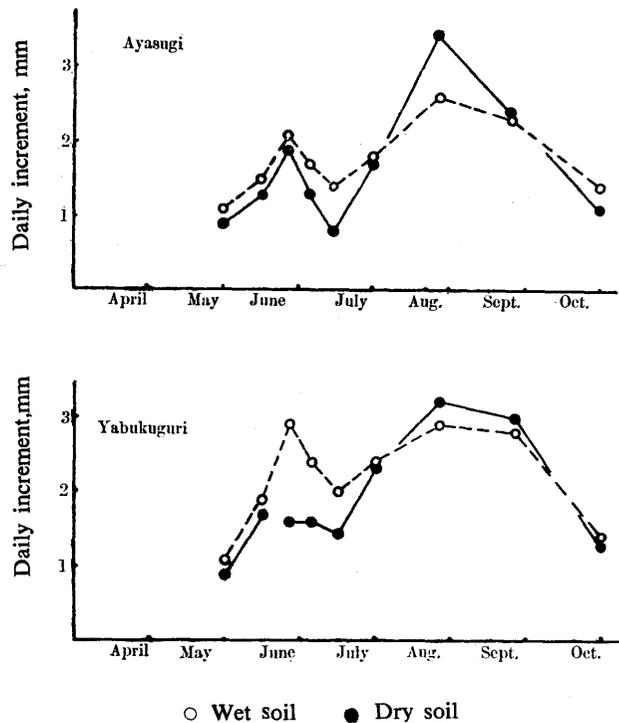
4月下旬に成長を始めてからの, 成長経過は Fig. 20 に示される。

1962年の成長開始は, 両品種とも4月下旬であって, 土壤水分の多少が成長開始に影響することはなかった。5月から6月にかけて成長は増大したが, 7月に一時おとろえた。8月から再び増加し, アヤスギは9月以降減少するが, ヤブクグリは9月まで持続し, 10月になると成長がおとろえ, 休眠期にはいった。土壤水分との関係は図にみられるように, 成長期の前半はあきらかに湿潤土の成長がよかった。特にヤブクグリがいちじるしい。7月の成長停滞は土壤水分に関係なく表われるが, 湿潤土の方が成長量は大きい。7月下旬には再び成長がさかんになるが, 水分とは関係がない。成長の後半になると, 前半とは逆の現象がみられる。すなわち湿潤土では成長がむしろ抑制し, 乾燥土の方が成長がよかった。しかし休眠期に近づくると再び湿潤土の成長がよくなり, 結局一年間の総成長量で比較すると, すでにあきらかにしたように湿潤土の方がよかった。

スギの成長周期は, ここでは土壤水分にかかわりなく7月に谷をもつ凹カーブを描いたが, 湿潤土は谷が浅く2つの山の高さはあまりちがわない。乾燥土では山の高さがかなりちがいで後半が高く, 土壤水分があきらかに成長周期に影響していると考えられる。Fraser¹⁹⁾はしめった土壤では水分が地温の上昇をさまたげるので, 春の成長開始を遅らせるといっているが, この実験の範囲では成長開始に差がみられなかった。8—9月の土壤水分の成長抑制については, 湿潤土の含水率は27%, 乾燥土は12%で, 水分過剰とは考えられない。むしろ地温の低下が間接的に成長を抑制したと考えた方がよいかもしれない。

もし人工的に土壤水分の管理ができるならば, スギの上長成長のためには, 7月まで灌水し, 8—9月は乾燥させる方がよいことになる。林地灌水をおこなう場合には, こうした資料からの検討が望ましい。

Fig.20 Height growth periodicity during growing season in the wet and dry soil.



5. 考 察

土壤水分と植物の関係をしらべる場合、最も困難なことは、圃場試験であれ、ポット試験であれ、土壤水分の調節技術である。通常この種の試験は、含水率や容水量に対するパーセントで示されているが、常にその状態に維持することはむずかしい。この実験では、蒸通発量を基準にして土壤に水分を供給した。1961年の処理は、降雨のみの Dry 区と灌水する Moist 区、Wet 区をつくった。1962—63年は、1ヶ月の蒸通発量を約 100mm と考えて Wet 区とし、Moist 区は、50mm、Dry 区は 20—30mm 灌水した。水分の供給はすべて地表灌水によったため、地表面と根系層の土壤含水率に差のあることがわかったが、実験はそのままおこなわれた。スギの水分に関する危険期と考えられる^{12), 88), 89)} 5—6月の雨量は、1961年には 250mm あり、灌水量の増加につれて上長成長もよかった。1962—63年の実験結果からは蒸通発量以下の灌水量では、上長成長にはあまり影響しないようだ。肥大成長は 250mm 前後が最もよく、これ以下でも以上でも成長がおとろえた。葉の成長は、250mm 以下では肥大成長に似ているが、それ以上のデーダーがないのははっきりしたことはいえない。このように林木は器官によって水に対する要求がちがうようで、この関係は形状比や T/R 比に示される。形状比は湿潤地ほど高くなり、実際の林地に灌水した場合にもみとめられた⁵⁰⁾。

植物は成長の盛んな時期に、十分な水分を要求すると考えられている^{19), 89)}。スギの上長成長周期を湿潤土と乾燥土でしらべてみると、シーズンによって土壤水分に対して反応のちがうことがわかった。5—6月はあきらかに、Wet 区の成長がよかった。また7月にあられる一時的な成長低下も Wet 区の方が少なくてすんだ。しかし8—9月にかけての上長成長は、土壤水分の多少とマイナスの相関がえられた。Wet 区の土壤含水率は 27% 程度だから、多湿による害作用とは考えられない。地温の低下による成長抑制と考えた方がいいのではないか。中村(1963)が、アヤスギ苗木を 15, 20, 25, 30, 33°C の温度処理をして、フアイトロンで育てた結果、6月頃の最大成長は 25°C にあらわれたが、8—9月の最大成長は 30°C であった。すなわち成長後期には、30°C 付近を適温とすることがわかった⁹²⁾。したがってスギの上長成長には、生育前半は水分が、後半は温度が支配的だと考えれば、成長周期と水分との関係が説明できる。

IV. 幼令林の水分収支

降雨は、土壤に達する前に、クローネによって遮断され、その一部はそのまま蒸発し、残りは幹を流下して地表に達する。クローネのすき間から土壤に達した雨は、土壤水分の不足を補い、地表面が飽和するにつれて、下層に浸透していく。そしてさらに余分な水が地下から流出する。したがって一地域の、ある期間の水分収支は、次のように模式化される。

$$P = D + E + G + M$$

P は降水量、 D は流出量、 E は蒸通発量、 G は地下水補給量、 M は土壤水分増加量である。もし地下水位の変化しないような模型流域を仮定すれば、 G は 0 となり、また水年を収支のさかいにすれば、も $M0$ になる。したがって、こうした林分での水分収支の式は、次のように単純化される。

$$P = D + E$$

林分の水分収支を解析するためには、上式のうち2項目が既知であればよい。一般には P と D が既知で、 E が未知の場合が多い。実際の森林に適用しようとする、 G や M の項目が入ってきて複雑になる。幼令林にかぎってはライシメーターによって、模型林分の水分収支をすることができる。

方法, 材料

ライシメーターでは、 P と D が既知であるから、蒸通発量 E の推定が容易である。水分収支の解析のために3種類のライシメーターが用いられた。

L1 ライシメーターは、タテ、ヨコ、フカサ1mのコンクリート・ブロック10箇からなり、5ブロックに3年生スギ、5ブロックにヒノキを4本ずつ植栽した。土壌は砂壤土で、砂と赤土を5:4の割合に混ぜた。

L2 ライシメーターは、直径、フカサ70cmの円筒で、1年生クモトオシ3本の区と対照区を設けた。土壌は赤土、褐色土、黒色土(火山灰土)の3種類である。

L3 ライシメーターは、L1と同型であり赤土と砂の混合割合を7:3または3:7にした。1年生クモトオシを4本ずつ植えた。

結果, 考察

1963年5-9月の降水量、流出量、蒸通発量は、L1ライシメーターで測定した結果、Table. 38 のようであった。

Table. 38 Water budget for the Lysimeter (L1)

Month	Precipitation	Run off		Evapotranspiration	
		Sugi	Hiniki	Sugi	Hinoki
May	496.3mm	443.4mm	445.3mm	52.9mm	51.0mm
June	503.8	413.4	459.2	80.4	54.6
July	222.0	—	—	—	—
August	318.9	248.9	258.3	90.0	80.6
September	114.2	53.0	54.9	61.2	59.3

5月の蒸通発量は、ヒギ、ヒノキとも約50mmであった。6月になるとスギ林の蒸通発量は急速に増加し、これは成長の増加とむすびついている。しかしヒノキ林の蒸通発量は、めだつた増加がみられなかった。8月の蒸通発量はスギ90mm、ヒノキ林80mmで、スギ林の方がやや多く1年間の最大値を示した。9月にはいとスギ林、ヒノキ林とも60mmに低下し、樹種間に差がみられなかった。

赤土、褐色土、黒色土(火山灰土)の3種類の土壌による蒸通発量は、L2ライシメーターで7-9月に測定した結果、Table. 39 になった。

7月29日-9月2日の赤土の蒸通発量は86mm、褐色土は85mm、黒色土は113mmであった。裸地から蒸発量は、土壌によってかなりちがいが、黒色>赤土>褐色土となった。蒸散量は蒸通発量と蒸発量の差で示され、赤土、黒色土は18-19mmだが、褐色は40mmとかなり高い値を示した。

Table. 39 Evapotranspiration from the three kinds of soils, red, brown and black (volcauc ash) soil. (July 29-Sept. 2 1963)

Soil	Evapotranspiration		Transpiration
	Naked	Planted	
Red soil	68mm	86mm	18mm
Brown soil	45	85	40
Black soil	94	113	19

土性のちがいによる蒸通発量は、L3 ライシメーターで、砂と赤土の混合比をかえた場合 Table. 40 のようになった。

Table. 40 Water budget for two kinds of soil texture, mixed sand and red soil. (Aug. 20-oct. 2 1963)

Sand:Red soil	Precipitation	Run off	Evapotranspiration
7 : 3	225.7mm	116.8mm	108.9mm
3 : 7	225.7	109.1	116.6

砂は赤土にくらべ有効水が少いために、砂の割合を高めると、蒸通発量は減少する。土壤が水で飽和している場合には、蒸発量は土性や土壤の種類とは、あまり関係がないようであり、ある程度、乾燥がすすんでから蒸発量に影響するようである。

L1, L2, L3 ライシメーターの測定値の相互を比較してみると以下のようになった。L2 ライシメーターの測定は、7月29日から9月2日までおこなわれ、これは8月1ヶ月間の蒸通発量と大差ないと考えられるから、L1 ライシメーターの結果とかなりよく一致する。L3 ライシメーターの測定は、8月20日—10月2日におこなわれ、同期のL1 ライシメーターの結果と比較すると、わずか 10-20mm のちがいがみられたにすぎない。ライシメーター間で蒸通発量にちがいのあらわれる原因はいろいろ考えられるが、ここでとりあげた樹種、土壤、土性のすべてが影響していると考えられる。

幼令林の蒸通発量は、Table. 38-40 に示されたが、後述の方法（第3部、II）によって蒸散量を計算すると次のようになる。L1 ライシメーターの葉量は、乾重でブロックあたり平均 400g であった。温度の函数として蒸散量を求めると（公式—64）Table. 41 の最後列になる。7—8月の蒸散量は 38mm で最も多く、5月の約 2 倍である。蒸発量は幼令林では蒸散量よりかなり多いようである。Table. 38 では7月の測定値が欠けているが、Table 41 では地表面からの蒸発量を 50mm と考えて表を完成した。

Table. 41 Water budget for young forest in 1963

Month	Precipitation	Run off	Evaporation	Transpiration
May	496mm	443mm	33mm	20mm
June	504	423	55	26
July	222	134	(50)	38
August	320	249	52	38
September	114	53	34	27

蒸通発量は、その年の気象条件にかなり影響されると考えられるが、平年における水分

収支を計算する Table. 42 に示される。幼令林では、蒸通発量に対して雨量が不足するということはなく、毎月の雨量の約50%が余剰水として流去していると考えられる。

Table. 42 Water budget for young forest in average year

Month	Precipitation	Run off	Evaporation	Transpiration
May	116mm	63mm	33mm	20mm
June	245	164	55	26
July	227	139	50	38
August	153	63	52	38
September	243	182	34	27

V. 総合考察

降水は、陸上生態系における唯一の水分供給源であり、土壌を湿潤にし、根系によって植物に吸収される。水分供給の多少は、主に成長組織の膨圧に影響し、光合成によって物質生産を支配する。雨量が不足すると土壌は乾燥する。土壌中に有効水が残っている間は、無降雨日がつづいても、植物にとって決定的な制限因子にはならないが、凋萎点以下にまで土壌が乾燥すると、植物は生育できなくなる。凋萎点以上での、土壌乾燥に対する植物の反応は、まず蒸散による水分の消失を、抑制する現象にあらわれると考えられる。すなわち、土壌が圃場含水量から徐々に乾くにつれて、植物の水に対する競争がはじまる。これは植物と土壌水分、植物と大気湿度といった外的な競争から、植物内部での葉の新旧や位置における水に対する競争になる。

土壌との関係、すなわち吸水作用の結果、土壌水分、根系細胞の滲透圧が高まり、根毛は土壌水分と土壌粒子との間の吸着力以上の力で吸水する。この吸収力は、土壌が乾燥するにともなって増大し、凋萎点より少し湿った状態で最大になるものと考えられる。土壌含水量と根の含水量との関係をしらべてみると Fig. 5 に示すように、圃場含水量での根の含水量は約100%で、土壌の乾燥につれてゆるやかに増大し、凋萎点の少し上あたりで150%と最大に達した。それ以上乾燥すると、根の水分は地上部からの蒸散作用によって急速にうばわれ、吸水も不可能になると考えられる。

対外的な競争のもう一つの面は、蒸散作用の低下にあらわれる。この現象は、土壌が乾きはじめた場合、まず最初にみられる植物の反応であって、この作用によって植物は乾燥に耐えることができる。すなわち蒸散作用を低下させることによって、植物の器官、特に葉の含水量が急に低くなるのをふせぎ、正常な生理作用を営まんとするわけだが、こうした状態ではすでに気孔は閉じ、物質生産に必要な炭酸ガスの吸収が困難になっている。気孔閉鎖による含水量の調節機能にも限度があるために、成長のさかんな若い組織では、土壌がある程度乾燥すると初期凋萎がみられる。

葉の含水量の低下は蒸散作用に対して制限因子となり、スギ1年生葉の場合、含水量を x 、蒸散量を T として対数変換すると、直線式、 $\log T = a + b \log x$ が適用される (11式—25式)。 b を LMT 係数 (Leaf Moisture-Transpiration) とすると、林木のもつ性質と理論的には関係がみいだせるものと考えられる。今回の実験では、ホンスギの LMT 係数は 1.56、ウラセバルは 2.62 で、係数の小さいホンスギは葉の含水量にはあまり影響されずに

蒸散作用をおこなうことができる。しかしウラセバルは葉の含水率のわずかの低下が蒸散作用を減少させ、間接的に成長を制限する。葉の含水率は土壤水分と関係があるから、LMT 係数は耐乾性や土地要求度とむすびつくはずである。現実の林分調査の資料と比較してみると、耐乾性との関係はあきらかではないが、土地要求度とは相関をみとめることができた。すなわち、LMT 係数の高い品種は土地要求度が高く、LMT 係数の小さい品種は土地要求度が低いと考えられる。こうした資料からスギ品種を土地要求度の高い順にならべると、ウラセバル、メアサ、アヤスギ、ヤブクグリ、ホンスギ、ニンジンバとなった

土壤を湿潤と乾燥にたもって上長成長の周期をしらべてみると、シーズンによって水分に対する反応のちがうことがわかった。上長成長は6月と9月に山があり、盛夏に一時的な成長停滞を示すが、湿潤地における成長停滞は乾燥地程めだたない。この時期の前後では土壤水分に対する反応がまったくちがった。5—6月の上長成長は湿潤地がよいが、8—9月になると、乾燥地がよかった。乾燥地の地温は湿潤地よりやや高い。スギの成長のための適温は、フアイトロンの実験⁹²⁾では、25—30°Cの間にあると考えられるが、成長の前半では25°Cに近く、後半は30°Cに近く高温を要求するようである。したがってスギの上長成長には5—6月が水分、8—9月が温度を制限因子と考えることができる。5—6月に水分が制限因子になることは、年成長と月別雨量との相関からも証明される⁸⁹⁾。

第3部 成木の水分経済

I 森林土壤の含水率

土壤水分は雨量と流出、蒸発発の間のバランスに依存していて、地形、気象等の因子に影響される。気象因子との関係についてはかなり解析されている。例えば玉手(1929)が黒色植土の20cmの深さの含水率と雨量、蒸発量、地温との間に相関係数を計算したところ、測定の日以前の雨量は0.46、蒸発量は-0.79であり、地温は5日前が-0.75、10日前が-0.73、15日前は-0.70であった。Stickel(1931)によると、落葉の含水率との間には、蒸発量0.74、地表温度0.67、最後の雨からの時間0.67の相関係数が得られた。山谷(1951)のヒバ林土壤の調査では15日前の雨量、蒸発量と関係があり、一般に蒸発量の方が相関が高かった。伏谷(1952)は、三重県でヒノキ林と裸地の土壤含水率の年変化をしらべているが、それによると四季の雨量配分にも関係するが、気温の高低、森林植生の通発作用の盛衰にも関係し、結論は森林の含水率という観点から森林の理水機能を解明することは困難だということであった。

ここでは1959年9月から1961年1月までの地形別、土壤型別、深さ別の含水率をしらべた。

調査地の概況、調査方法

調査地は九州大学粕屋演習林大倉団地で、標高は100m以下、傾斜30度前後の北面の造林地である。プロット、および土壤は次のようであった。

I区 斜面上部、スギ30年生、B_A型

N 10° W

L層 5cm, F層 3cm, H層2cm, A₀層はほとんど スギの落葉, A₁層 0-15cm, 細根多く, 細粒構造, 粗鬆. A₂層 16-30cm, 堅果状構造. B層 31-45cm, 礫に富む.

タブ, ムラサキシキブ, イヌビワ, ネズミモチ, カゴノキ, ヒサカキ

II区 斜面上部, ヒノキ10年生, B_A型

N 5° E

L層 3cm, F層 2cm. A層 0-10cm 下草植生の細根密. B層 11-60cm.

カヤ, ササ, リョウボク, ヒサカキ, シダ

III区 斜面中腹部, ヒノキ30年生, B_B型

N 10° E

L層 3cm, ヒノキの落葉. A層, 0-20cm, ヒノキの中程度の根が多く, 団粒構造がみられる. 淡赤褐色, 下部に堅果構造がみられる. B層, 21-45cm. 礫を含み, 褐色.

アオダモ, アオキ, ムラサキシキブ, ヒサカキ, シダ

IV区 斜面下部, スギ10年生, B_D型

N 35° E

L層 1cm, H層 1cm. A₁層 0-8cm, A₂層 9-20cm, 黒色, 団粒構造が発達している. B層 20-, 淡褐色, 礫を含む(蛇紋岩)

. カヤ, ササ

V区 斜面下部, スギ3年生, B_E型

N 40° E

L層 3cm, H層 2cm. A層 0-45cm, 上部10cmの深さまで草の根が密生している. 淡褐色. 団粒構造. B層 60cm-, カベ状構造,

カヤ, イラクサ, シダ, カズラ, アカメガシワ, ラミ, ヒサカキ, イヌビワ

調査期間中の気象は次のようであった.

Table. 43 The weather in Kasuya forest

	1959 Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	1960 Jan.
Temperature °C	24.2	18.4	13.6	8.9	5.3
Humidity %	76	72	75	69	66
Precipitation, mm	140	19	100	114	66

土壌水分の測定は, 毎月20日頃, 上記5プロットについて 20, 40, 60cmの深さから採取, 105°Cで乾燥し, 絶乾に対するパーセントを, さらに最大容水量に対する割合を求めた.

結果, 考察

5プロットの季節別, 深さ別の土壌含水率を最大容水量に対する割合で示すと, Table. 44 のようになる.

Table. 44 Soil moisture content of several forest soil typs from autumn to winter

Plot	Soil type	Depth	1959				1960
			Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.
I	BA	20cm	54.4%	37.3%	28.6%	54.1%	62.3%
		40	52.3	31.5	31.5	55.8	65.1
		60	56.7	31.7	31.9	51.4	52.0
		mean	54.5	33.5	30.7	53.8	59.8
II	BA	20	53.5	42.0	51.6	56.6	54.7
		40	57.4	36.6	56.2	73.1	52.8
		60	52.3	35.6	55.6	61.8	48.0
		mean	54.4	38.1	54.3	63.8	51.8
III	Bb	20	66.0	79.7	61.7	58.6	83.3
		40	58.5	65.9	58.1	67.3	70.1
		60	60.2	38.2	53.5	67.1	72.6
		mean	61.6	61.3	57.8	64.3	75.3
IV	Bd	20	92.8	69.4	75.9	84.4	56.5
		40	78.7	63.7	52.0	68.9	47.1
		60	71.5	54.5	44.8	63.5	44.3
		mean	81.0	62.2	57.6	62.3	49.3
V	Be	20	73.6	70.0	74.0	74.4	67.5
		40	75.2	73.2	88.1	69.8	57.8
		60	75.2	62.0	83.1	52.5	64.1
		mean	74.7	68.4	81.7	65.6	63.1

Analysis of variance

Source	DF	SS	MS	F
Plot	4	5856.1835	1464.0459	14**
Season	4	1733.8195	433.4549	4*
Depth	2	927.4891	463.7446	4.5**
Error	65	6829.7474	105.0730	

Total 75 15347.2395

** ; significant at 1% level * ; significant at 5% level

分散分析の結果, プロット, シーズン, 深さのすべてに有意差がみとめられた. プロットでは, 斜面上部の I 区, II 区が乾燥し, とくに I 区の含水率が低いのは, クローネ (スギ30年生) がうっ閉しているため, 耐陰性の強い灌木が点在するのみで, 地表はほとんど裸出している. さらに隣接地が新植地のため風が強く, 地表面からの蒸発を促進している. 又クローネによる雨の遮断も, 地表面に対する雨の絶対量が減少するために, 含水率の低下に関係する. II 区は, I 区と 200m はなれたプロットで土壌型, 地形, 標高がほとんど等しいが, ヒノキ幼令林で, クローネがうっ閉していないために地表植生が多い. こうした

地表植生は夏には、蒸散作用によって土壤を乾燥さすが、冬にはむしろマルチの効果で含水率を高めるものと考えられる。III-V区の土壤含水率はI, II区より高い。しかしIII, IV, V区の間には明白な差はみとめられない。傾向としてはIII区の含水率がやや低い絶対的なものではない。IV, V区の場合にも冬の間は地表植生の密なV区の方が含水率が高い。これも一種のマルチと考えてよさそうに思える。土壤含水率と相関が高いといわれている雨量との関係を見ると、10月は19mmで少雨で、I-II区の含水率は最大容水量に対して30%台まで乾燥した。土壤乾燥の原因は、雨量と蒸通発量のバランスによるものであるから、10月には蒸通発量に対してかなり水分が不足し、蒸通発のために土壤中に貯えられた有効水をかなり使ったことになる。

II スギ林の水分収支

1. 緒 言

森林からの蒸散量は、陸上生態系の水分収支における支出の大きな部分である。森林からの蒸散量を直接測定することは不可能で、気象因子等による推定が行われている。

HORTON (1923) による推定式は次のようであった。

$$Td = \frac{0.2755Wr \cdot Lr \cdot dh \cdot N}{1,000,000} \cdot \frac{Ec}{5}$$

但し Td : 蒸散量 (inch/acre), d : DBH (inch), h : H (feet), N : 植栽本数 (acre), Ec : 蒸発量, Lr : 1 inch feet に対する葉の乾燥重量, Wr : 蒸散量/葉の乾重. BATE (1923) は飽差 (Hd , mmHg) から次のように推定した。

$$T \text{ (inch)} = 235.1 Hd + 28.1$$

MEYER (1928) は温度 ($t^\circ F$) から推定した。

$$T \text{ (inch)} = 0.087 t - 372$$

THORNTHWAITHE・HOLZMAN (1942) は地表面蒸発 (E) も加えた蒸通発量を温度 ($t^\circ F$) から推定した。

$$T + E = 0.083 t - 3.35$$

山岡は (1956) スギ切枝の蒸散量と輻射強度 (R cal/cm/min) と飽差 (Hd mmHg) との相関から推定した。

$$T_0 = (0.14 R + 3.35) Hd + 3.08 R$$

またPAPADAX (1962) は、飽差の20倍を水分要求量と考えて、蒸散量を推定した。KITTREDGE (1949) によれば森林の蒸通発量は25-750mmの間にあり、MEYER (1928) によれば North Central では落葉樹が200-300mm, 灌木が150-200mm, 針葉樹は100-150mm である。

あ次に内外の文献から森林の蒸散量をまとめると Table 45 のようになる。

林令にもとづく蒸散量の差は HÖHNEL や ZON の古い研究によれば、林令にもなって蒸散量も増大した。季節的变化については、佐藤 (1958) がスギ、ヒノキ、アカマツでしらべた結果、スギは夏に1日4.8mm, 冬に1.9mm, ヒノキは夏に、3.9mm, 冬に1.9mm, アカマツは夏に3.5mm, 冬に1.3mm であった。蒸散作用は同一シーズンでも環境によって変動する。門田 (1950) によれば、クロマツ林の夏の蒸散量は快晴日は1日に1.63mm, 曇天日には1.07mm であった。

Table. 45 Average annual depth of transpiration from forest

Species	Transpiration,mm	Investigators
<i>Cryptomeria japonica</i>	1230	Satoo
"	392-495	Shibata
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	970	Satoo
"	233-452	Shibata
<i>Pinus densiflora</i>	680	Satoo
"	633-1242	Shibata
"	645.5	Taneda
<i>Pinus silvestris</i>	103	Vater*
"	47	Burger*
"	157.5	Schubert
<i>P. pinaster</i>	149	Henrici+
<i>P. radiata</i> , young	885	"
" old	760	"
<i>Larix decidua</i> , 60-100 year	670	Schubert
<i>Picea Abies</i> Karst	255	Vater*
"	170 180	Burger*
" , 35 year	250	"
" , 98 year	187.5	"
" , 60-100 year	315	Schubert
<i>Fagus</i> , 35 year June-Nov.	50	Zon
50 year	233	Höhnel
55 year, June-Nov.	225	Zon
50-60 year	184.9	Höhnel
115 year	272	"
115 year, June-Nov.	375	Zon
150 year	352	Höhnel
150	210	Burger*
<i>Acacia mollissima</i>	2500	Henrici+
" large tree	1047	"
" plantation	888	"
<i>A. dealbata</i> , plantation	1042	"
<i>A. decurrens</i>	524	"
<i>Eucalyptus stuartiana</i> , young	1186	"
" old	1200	"
<i>E. diversicolor</i> , plantation	1248	"
<i>E. lindleyana</i> , plantation	429	"
<i>E. macarthurii</i> , plantation	268	"

* cited by Büsgen, M. walabäum, 1927

+ cited by Kittredge, J. The influence of the forest on the weather and other factors, 1962

水文学の立場からすると、森林からの蒸散量に土壤面蒸発量を加えた蒸通発量 (Evapo-transpiration) を用いる方が便利な場合がある。蒸通発量は気象因子にもとづく推定がこころみられており、THORNTON-WAIT や BELANEY-CRIDDLE による方法がしられている⁵¹⁾⁵⁸⁾¹⁴³⁾。

2. スギ林からの蒸散量

A. 苗木の蒸散量からの推定

ファイトトロン中の苗木のデータからは、次のようにして推定される。ここでは地上部が1日に蒸散する量を計算の基礎とする (Table. 10)。5月の福岡市の平均気温は17.6°Cで、ファイトトロンでは15°Cと20°Cの間にある。そこで15°Cの蒸散量0.60ccと、20°Cにおける蒸散量0.74ccから、比例計算によって0.67ccが得られる。スギ林の葉量を、かりに生重で37t/haとすると、森林からの蒸散量は、5月は76mmとなる。同様に、6月は21.6°Cで、ファイトトロンでは20°Cと25°Cの間で、1.17ccが得られ、森林からの蒸散量は、128mmと計算される。これを他の月におしすすめると、7月172mm、8月162mm、9月86mmとなった。(Table. 46)

Table. 46 Transpiration from forest calculated by the data of seedlings (Table.10)

Month	Temperature, t°C	Transpiration loss of seedling, cc/g/day					t°C	Forest mm/Ha
		15°C	20°C	25°C	30°C	33°C		
May	17.6	0.60	0.74	—	—	—	0.67	76
June	21.6	—	1.07	1.37	1.74	—	1.17	128
July	26.2	—	—	1.45	1.94	—	1.52	172
Aug.	26.8	—	—	1.13	—	—	1.43	162
Sept.	22.5	—	0.59	1.00	—	—	0.74	86

B. 蒸散量の推定式

切枝の蒸散量と温度との関係は、次のように数式化された。

$$T = -0.0079 + 0.0014 t + 0.0001 t^2 \dots \dots (1)$$

$$\log T = -0.0088 + 0.0125 \log t \dots \dots (2)$$

T: 蒸散量, cc/g·hr, t: 温度°C

これ等の関係は、実験室内における切枝の例であるから、いきなり森林の蒸散量の推定まで拡大することはできない。そこでライシメーターにおける幼木の蒸散量を、野外における森林の蒸散量と仮定して、係数Kによって修正し、森林の蒸散量の推定式とした。係数Kは次のようにして決められた。6—8月にかけてのライシメーターにおける幼木の蒸散量を従属変数にし、その時の平均温度(t)にもとづく切枝の蒸散量(T)を独立変数として、最小二乗法によってK=1.42を決定した。(1)式にK=1.42をかけると

$$T = -0.0112 + 0.0019 t + 0.0001 t^2 \dots \dots (63)$$

となるが、森林の蒸散量の推定に便利な単位、(1/kg·day)に書きかえると、最終的には次式が得られた。

$$T = -0.269 + 0.046 t + 0.003 t^2 \dots \dots (64)$$

$$\log T = -2.16 + 1.86 \log t \dots \dots (65)$$

Tは乾葉重1kgあたり、1日に蒸散する水の量(1)であるから、森林の蒸散量を計算によって求めるには、林分のもつ葉の量を知る必要がある。

C. スギ林の葉量

森林の蒸散量は、温度(t)と葉量を函数として推定することができる。すなわち両因子

とも蒸散作用との相関はかなり高い。葉量については多くの報告があり、林分ではうっ閉したのちは一定になるといわれている。

調査地

熊本県阿蘇郡波野村大戸口の民有林で、海拔高約850m、阿蘇根子岳の東方、阿蘇外輪の縁に近く位置し、ほとんど平坦に近く、黒色火山灰土の堆積した土壌である。林分は1925年にアヤスギに少量のエドスギを混ぜて、ヘクタールあたり3000本の密度で植付けた。1953年(28年生)に間伐をかねて列状に伐採し、翌年伐採跡にアヤスギを植栽した。ヘクタール1500本でほぼうっ閉している。1960年9月に再び列状に伐採した林木のうちから、平均木をえらんで、葉の量をしらべた。

結果

調査結果は次のようである。

Table. 47 Leaf weight of trees sampled, Ayasugi, 34 year.

Height, m	DBH, cm	Volume, m ³	Number of branches	Weight, kg			
				branches	Leaves		
					Dead	Fresh	Dry
10.5	19.5	0.1579	142	16.9	2.3	27.1	14.2
9.8	17.0	0.1166	131	11.0	2.0	22.6	10.8
13.3	23.6	0.2882	137	11.5	—	23.8	11.9
						24.5	12.3

スギ林の葉量はヘクタールに生重で36.7t、乾重で18.5tという数値が得られた。

D. スギ林の蒸散量

推定式(63)およびスギ林の葉量(18.5t/ha)とから、森林の蒸散量を推定すると、福岡、日田、飢肥、阿蘇山ではTable 48のようになる。またFig 21に示される。

Table. 48 Monthly transpiration from sugi forests

Month	Fukuoka		Hita		Obi		Aso	
	t°C	T, mm	t°C	T, mm	t°C	T, mm	t°C	T, mm
Jan.	4.8	1	3.3	0	8.4	18	-0.8	0
Feb.	5.2	2	4.0	0	9.3	21	0.1	0
Mar.	8.3	17	7.3	12	11.1	34	4.0	0
Apr.	13.2	46	12.3	40	15.6	63	9.5	23
May	17.6	81	16.9	76	19.3	96	14.2	56
June	21.6	114	21.3	111	22.1	119	17.6	81
July	26.2	167	25.3	157	25.6	160	21.5	120
Aug.	26.8	173	25.8	162	26.6	171	21.7	122
Sept.	22.5	123	22.0	118	23.9	135	18.6	89
Oct.	16.5	72	15.6	65	19.0	94	13.1	48
Nov	11.7	36	10.8	31	15.2	60	8.1	16
Dec.	7.2	12	5.6	4	10.3	29	2.4	0
Total		844		776		1000		555

t; temperature T; Transpiration

3. スギ林の水分収支

森林の水分収支の計算は、林木からの蒸散量と地表面からの蒸発量をたした蒸通発量が基礎になる。蒸散量はすでに土壌水分が十分にある状態での蒸散量として、福岡の場合 844mm が求められている。地表面蒸発量は森林の状態や、地表面の凹凸の有無によってもちがうといわれるが⁷⁷⁾、ここでは水で飽和した土壌からの蒸発量は自由水面からの蒸発量の13%だという Kittredge⁵⁹⁾ の数値を用いて、福岡における蒸発量を推定した。月別の蒸通発量は Table. 49 のようになった。

福岡の雨量は平均 1600mm で、九州地方ではむしろ少雨である。過去70年の気象統計⁹³⁾(1890—1960)のうちで、最多雨年は1953年の2441mmであり、一方最少雨年は1939年の1000mmであった。平均年、最少雨年、最多雨年について水分収支計算をすると Table. 49 のようになった。平年では、雨量は蒸

Fig.21 Transpiration from sugi forests in several districts

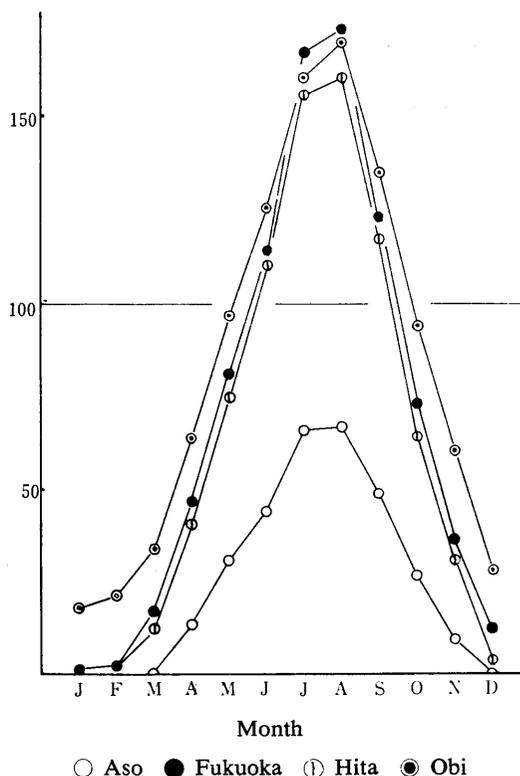


Table. 49 Water budget of stands in Fukuoka prefecture.

Months	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Annual
Trnspiration, mm	1	2	17	46	81	114	167	173	123	72	36	12	844
Evaporation, mm	7	7	12	15	18	18	23	23	16	13	9	7	168
Evapotranspiration, mm	8	9	29	61	99	132	190	196	139	85	45	19	1012

Average year (1890—1960)

Precipitation, mm	64	80	94	116	116	245	227	153	243	97	86	79	1601
Evapotranspiration, mm	8	9	29	61	99	132	190	196	139	85	45	19	1012
Water deficiency, mm	0	0	0	0	0	0	0	43	0	0	0	0	43
Water surplus, mm	56	71	65	55	17	113	37	0	104	12	41	60	631

Drought year (1939)

Precipitation, mm	69	80	102	145	41	80	99	69	76	145	80	10	1000
Evapotranspiration, mm	8	9	29	61	99	132	190	196	139	85	45	19	1012
Water deficiency, mm	0	0	0	0	58	52	91	127	63	0	0	9	400
Water surplus, mm	61	71	73	84	0	0	0	0	0	60	35	0	394

Rainy year (1953)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Annual
Precipitation, mm	67	74	120	82	206	1060	274	128	267	31	56	75	2441
Evapotranspiration, mm	8	9	29	61	99	132	190	196	139	85	45	19	1012
Water deficiency, mm	0	0	0	0	0	0	0	68	0	54	0	0	122
Water surplus, mm	59	65	91	21	107	928	84	0	128	0	11	56	1550

通発量を上まわっているが、8月は蒸通発量 196mm に対して雨量は 153mm で 43mm の水分不足がみられ、余剰水分は 631mm で、大部分が流出されるものと考えられる。1939年は最少雨年であり、1月から4月までは雨量の方が多かったが、5月は雨量が 41mm で 58mm の水分不足がおこり、この水分不足は9月までつづいた。10-11月は雨の方が多かったが、12月は再び水分不足となり、結局年間で 400mm の水分不足が生じた。最多雨年に相当する1953年は年雨量 2441mm だが、それでも8月と10月に合計 122mm の水分不足が生じた。

このように蒸通発量と雨量とのバランスをみると、最多雨年においてさえ、8月には雨量が不足することがわかる。年間をとおしてみると毎年10-40%に達する。過去70年の気象統計から雨量不足の生じる頻度を月別にしらべてみると次表のようになった。

Table. 50 Frequency occurred water deficiency in Fukuoka, 1890-1959

Month	Evapo-transpiration	Frequency	
May	99mm	27/70	38.5%
June	132	13/70	18.5
July	190	30/70	42.8
Aug.	196	54/70	77.1
Sept.	139	22/70	31.4
Oct.	85	38/70	54.3

8月における水分不足の出現頻度は77%で非常に高く、次いで10月の54%、7月の42%とかなり高い。水分経済的にみれば福岡の年雨量は、年蒸通発量を 600mm も上まわっているが、月単位の収入に変動が大きいために、支出（蒸通発量）がかなり制限されると考えられる。ただし余剰水がすべて流出されるものでなく、有効水として一時土壤中に貯えられ、ひきつづいておこる乾燥期間に蒸通発のために使用されるから、実際の水分不足は、この数値をやや下まわる。福岡を例にとると、スギ林の水分収支は Fig. 22, 23 に示される。平年雨量は 1601mm で、この状態では、8月に 43mm の雨量が不足することになるが、土壤中の有効水を利用するから、実際には水分不足はみられない。乾燥年、例えば、1012mm しか降らなかった1939年は、Fig. 23 に示すように5-10月に雨量が蒸通発量を下まわり、この年の雨量の不足は 400mm と計算された。土壤中の有効水の決定は、きわめて困難で、多くは 100-300mm と考えられている。かりに有効水を 200mm とすれば、5月からの雨量不足が 200mm に達するまでは、植物は土壤水分を使って生長することができる。雨量不足は5月 58mm、6月 52mm、7月 91mm であるから、7月までの雨量不足は、土壤中の有効水によって解消され、結局、8-9月に、直接乾燥の害をうけることになろう。

Fig. 22 Pattern of water budget for sugi forest in average year in Fukuoka

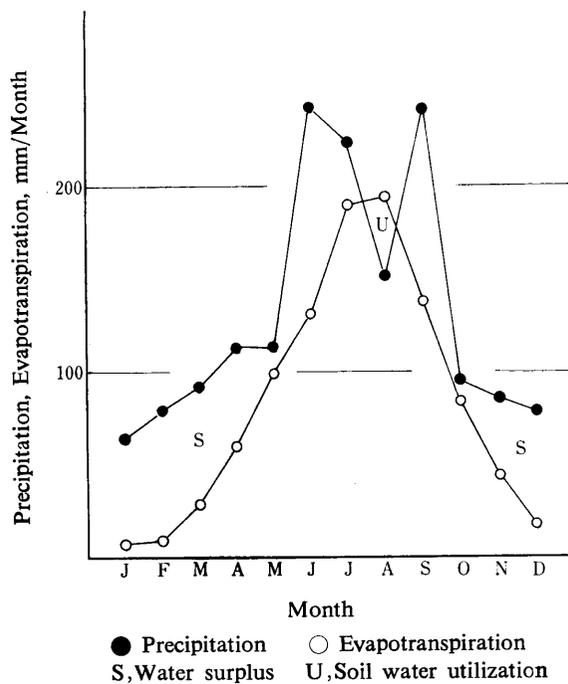
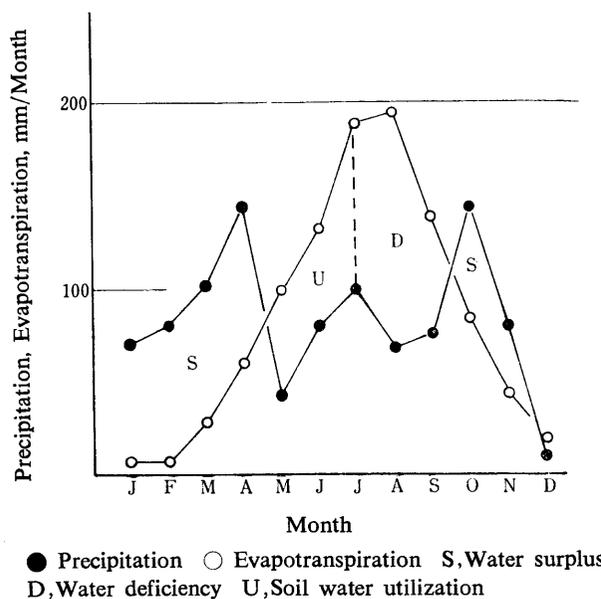


Fig. 23 Pattern of water budget for sugi forest in drought year in Fukuoka



4. 考 察

公式(65)による推定値と、ファイトトロン の 苗木のデータからの計算値とは、5—8月

はかなりよく一致し、その差は10mm程度にすぎないが、9月には約30mmのひらきがみとめられた。

九州の代表的林業地である日田、飢肥、福岡それに阿蘇山麓（波野）のスギ林からの蒸散量は、Table. 48のように推定された。ただしここでは葉の量を同一とみなしての計算である。阿蘇山麓波野地方で測定された乾葉重 18.5t/ha、生葉重 37t/ha という数値は、佐藤（1958）がスギ林の蒸散量の計算にもちいた数値（36.5t/ha）とよく一致する。山岡（1956）による61tという報告もあるが、普通の人工林の葉量として、37tという数値は桁はずれだとは考えられない。この条件をみとめるとすれば、スギ林の一年間の蒸散量は平均して飢肥で1000mm、日田で776mm、福岡で844mm、阿蘇山麓では555mmとなった。ファイトトロンの実験では、8月に蒸散作用の一時的な低下がみられたが、森林にもあてはまるかどうかは、現在の段階ではわからない。またこの計算には、土壌面からの蒸発量が除かれている。Kittedge(1948)によれば、水で飽和した林内の土壌面蒸発量は、自由水面の13%であり、この数値を用いれば、福岡の土壌面蒸発量は168mmで、結局スギ林の蒸通発量は1012mmになった。各地の蒸散量の季節的な変動をみると、飢肥では冬でもかなり蒸散作用はおこなわれるが、福岡では1—2月に気温が5°C前後に低下するため、蒸散作用はあまりおこなわれない。日田や阿蘇山麓では1—2月の蒸散作用はかなり少なく、水文学的には0として取扱われる。

III. 連年成長におよぼす雨量の影響

（要旨）*

九州大学粕屋演習林産の35年生実生スギ、アヤスギ、25年生ヤブクグリを材料にして、連年成長と雨量との関係をしらべ、この地方での、水分に関するスギの危険期と気象当量をあきらかにした。方法は、樹幹析解によって連年成長量を求め、さらに連年成長率（%、Observation〔O〕）と、最小二乗法による平均連年成長率（%、Estimation〔E〕）を求める。（O）と（E）の偏差から、成長偏差率（Growth Deviation Ratio〔GDR〕）を求め、解析の基礎とする。

$$GDR = \frac{O - E}{E} \times 100$$

GDRの数値については、文献(12)の表—5、(89)のTable-2参照。

解析のために3種類の仮定がもうけられた。仮定1は、成長に対する雨量の影響を連続的な効果と考え、GDRと成長期の月雨量との間に、相関係数を求め、相関係数の高い月を危険期と考えた。仮定2は、不連続な効果と考え、Azzi⁴⁾による方法によって気象当量をあきらかにした。雨量の気象当量は、過不足の異常な条件と、正常な条件を区別する雨量を意味し、降雨の充分な点と不充分的な点を決定的に区別する。仮定3は、少雨のみが成長を抑制するのだと考えた。その結果、降雨に関するスギの成長の危険期は5—6月で、気象当量は5月120mm、6月250—260mmが得られた。（文献(12)の表—6、(88)の2図、3図、(89)のTable-3、Fig 1）。GDRがプラスの年とマイナスの年の降雨の配布状態をみると（文献(12)の表—7）、一定の傾向をみだしにくい。ただプラスの年の配布状態は

* 九大演集報、17.51—58.1962. 参照

比較的単純なカーブを描くのに対して、マイナスの年は月による変動が大きい。それでも、プラスの年とマイナスの年を区別する拠点にはなりにくい。スギの成長を支配する雨の降り方は、季節的な配布状態そのものではなくて、危険期における雨量の絶対値の多少であると考えたほうがいい。1945年の年雨量は2192mmで、福岡では多雨であったが、危険期に少雨であったために成長が悪く、1938年は1533mmで、少雨であったが、危険期が多雨であったため、成長はよかった。

林木等の危険期については、(8), (13), (17), (23), (35), (45), (73), (85), (94), (106), (129), (130), (134), (154)の研究がある。

第4部 スギの林木ならびに林分についての水分収支試算

1. 林木について

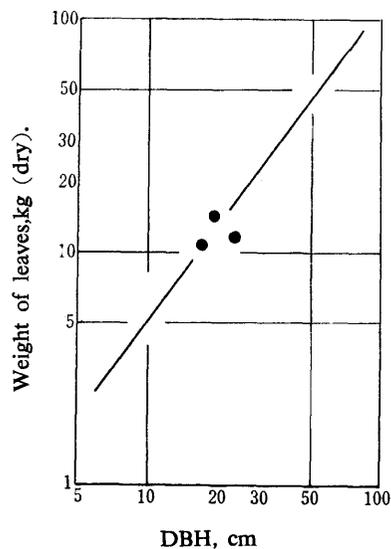
従来森林が成立するための条件として、最低500mmの降水が必要だといわれているが、われわれは林木自身の解答をまだ得ていない。そこで森林が成立するための水分条件を、現存するスギ林をモデルにして解析してみた。

林木であれ、林分であれ、水分収支や水分経済の解析には多くの仮定が含まれ、それらがすべて満足されたときはじめて完成される。

森林の条件の設定には、九州の平均的な地位として、またアヤスギを多く植栽している地方として熊本県をえらび、熊本地方スギ林収穫表(林野庁、昭和29年)がもちいられた。地位上における10, 20, 30, 40年における樹高、胸高直径、単木材積がTable.51の(1)―(3)にあたえられた。連年成長量は各年令時における1年間の成長量で、ひきつづいておこる5―10年間の成長量から比例配分し重量に換算して、(4), (5)に示した。葉重はFig. 24によって、胸高直径に対応させて乾重を求め(6)に示した。以上が森林の状況である。

スギの蒸散作用はすでにあきらかにしたように気象因子、とくに温度との相関が高く、(64), (65)式によって推定された福岡での蒸散量は、ヘクター当たり1年に844mmであって(Table-48), これは乾葉重1kgあたり456kgに相当する。したがって葉重(6)に456を掛けて、林木1年間の蒸散量を得(7)に示した。蒸散係数は苗木の場合約500という数値が、ファイトトロンの実験から得られているが、これをそのまま成木にあてはめることはむずかしい。そこで、1年間の蒸散量(7)を連年成長(5)で割って(8)に示した。林木が直接物質生産に使う水は蒸散量(7)を蒸散係数(8)で割って(9)に示した。林木が1年間に吸収する水の量は蒸散量(7)

Fig.24 Relation between DBH and weight of leaves



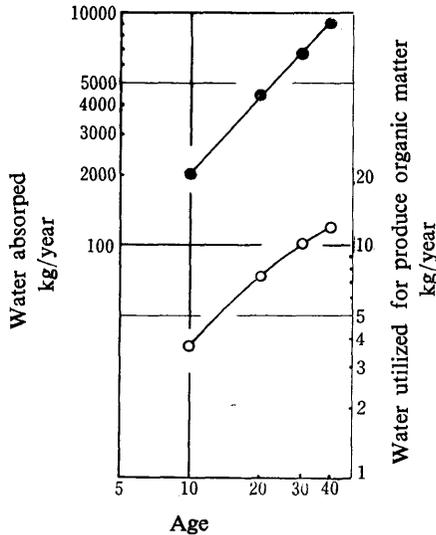
● Ayasugi, 34year, Kumamoto.

と利用水(9)の和で, (10)に示される.

Table. 51 Water economy of tree

Age	10	20	30	40
(1) Height, m	6.2	10.8	14.9	18.4
(2) DBH, cm	9.2	16.6	22.7	27.9
(3) Volume, m ³	0.0258	0.1360	0.3416	0.6029
(4) Weight, kg. dry fresh	10 24	52 125	121 290	212 510
(5) Annual growth, kg. dry fresh	3.9 9.5	7.6 18.3	10.2 24.5	12.0 29.0
(6) Leaf weight, kg. dry	4.4	9.8	14.5	20.0
(7) Water transpired by tree kg/year	2006	4469	6612	9120
(8) Transpiration coefficient	514	588	836	760
(9) Water utilized by tree kg/year	3.9	7.6	10.2	12.0
(10) Water absorbed by tree kg/year	2010	4477	6622	9132

Fig.25 Relation between tree age and water absorbed or water utilized for produce organic matter.



このようにして求めた林木の水分収支は, 10年生スギ1年間の吸水量は2010kg, 利用水として体内に残るのはわずかに4kgで, あとの2006kgは蒸散によって失われる. 20年生では4477kgが吸水され, 8kgが利用され, 4469kgが蒸散される. 30年生では6622kgが吸水され, 10kgが利用され, 6612kgが蒸散される. 40年生では9132kgが吸水され, 12kgが利用され, 9120kgが蒸散される. 10—40年生林木の吸水量は樹令との間で次の対数関係がみつめられた.

$$\log T = 2.22 + 1.09 \log x \dots (66)$$

T ; 吸水量 kg/本, x ; 樹令

樹令が1年ますごとに約218kgの水が要求され, 0.2kgずつ利用水は増加する.

林木の恒在水分は Table. 52 に示される. 葉の含水率は葉令, 葉位, シーズンによ

てかなり変動するが, 苗木や幼木の測定から平均200%が得られた. 幹の含水率は140%であり, 根の含水率は幹とあまり変わらないと考えられる. 幹に恒在する水分はかなり多く, 10年生で全体の54%, 20年生で73%, 30年生で73%, 40年生では71%であった. 葉, 幹, 根に恒在する水分は, 10年生で26kg, 20年生で101kg, 30年生で241kg, 40年生で419kg, であった.

林木の体内における水分構造は, 幼木では4年生アカバを例にして Fig. 4 に示された,

Table. 52 Dry matter and water contained in a tree.

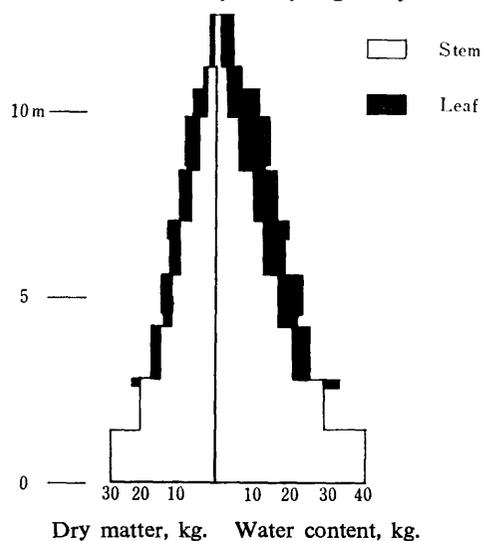
Age	10		20		30		40	
	A	B	A	B	A	B	A	B
Leaves, kg	4.4	8.8	9.8	19.6	15	29	20	40
Stem, kg	10	14	52	73	121	169	212	298
Root, kg	2	3.4	5.8	8	31	43	58	81
Total, kg	16.4	26.2	67.6	100.6	167	241	290	419

A; Dry matter, kg.

B; Water contained, kg.

葉の含水率は梢端程、またクローネの外周程高かった。根の含水率は幹とあまりちがわなかった。こうした含水率の分布様式は、シーズンを通じてあまりちがわないと考えられる。34年生アヤスギの水分構造は Fig.26 に示される。樹高12.6m、胸高直径23.7cm、材積0.24m³の阿蘇地方での標準木である。樹幹は1.4m 間隔に直径を求めスマリアン法で求積、重量に換算した。葉は梢端から2m 間隔に1年生葉と2年生以上の古い葉にわけて秤量した。葉の含水率は成長期の平均として、1年生葉360%、旧葉150%、幹の含水率は140%がすでに得られている。樹幹の乾物重と水分重は Table. 53 に、葉の乾物重と水分重は Table. 54 に示される。林木の水分構造は Fig. 26 のように、枝下高以上では、葉量の多少にともなって、デコボコを示している。幹、新葉、旧葉の乾物重と水分重をまとめたのがTable. 55 である。

Fig.26 Vertical distribution of water present in the body of Ayasugi, 34 year.



Dry matter, kg. Water content, kg.
Height; 12.6m DBH; 23.7cm. Volume; 0.24m³

Table. 53 Dry matter and water contained in a tree stem.

Height, m.	Dry matter, kg.	Water contained, kg.
11.2—12.6	2	2
9.8—11.2	3	3
8.4—9.8	5	6
7.0—8.4	7	10
5.6—7.0	10	13
4.2—5.6	12	17
2.8—4.2	15	21
1.4—2.8	20	29
0—1.4	28	40

Table. 54 Dry matter and water contained in leaves.

Height,m	Total leaves		New leaves		old leaves	
	A	B	A	B	A	B
10.6—12.6	0.8	2.9	0.8	2.9	—	—
8.6—10.6	3.9	7.6	0.8	2.9	3.1	4.7
6.6— 8.6	3.2	5.9	0.6	1.8	2.6	4.1
4.6— 6.6	2.7	4.8	0.5	1.5	2.2	3.3
2.6— 4.6	2.1	3.5	0.3	0.7	1.8	2.8

A, Dry matter, kg. B, water contained, kg.

Table. 55 Dry matter and water contained in a tree

	stem	New leaves	old leaves	Total
Dry matter, kg	101	3	10	114
Water contained, kg	140	10	15	165

2. 林分について

林木の結果をもとにした林分の水分収支は Table. 56 に示される。10年生林分の吸水量は 610.1mm で、1.1mm だけ利用され、609mm は蒸散される。20年生では 764.5mm が吸水され、1.2mm が利用され、763.3mm が蒸散される。30年生では 749.6mm が吸水され、1.1mm が利用され、748.5mm が蒸散される。40年生では 773.5mm が吸水され 1.0mm が利用され、772.5mm が蒸散される。

Table. 56 Water budget of Sugi stands

Age	10	20	30	40
Number of trees/Ha	3036	1708	1132	847
(3) Volume, m ³	88.4	244.4	386.7	510.6
(4) Annual growth, dry, ton.	11.1	12.3	11.5	10.0
(6) Leaf weight, ton.	13.4	16.7	16.4	16.9
(7) Water transpired by trees, mm.	609.0	763.3	748.5	772.5
(9) Water utilized by trees, mm.	1.1	1.2	1.1	1.0
(10) Water absorbed by trees, mm.	610.1	764.5	749.6	773.5

利用水として林分に残る水分量は約 1mm で、10—40年生ではあまりちがわない。吸水量は 10年生と 20年生以上の間には 150mm の差があるが、20年生以上ではあまりちがわない。30年生林分の吸水量は 20年生より低い、これは間伐による本数減少の結果である。

林分の恒在水分は Table. 57 に示される。10年生林分では 8.0mm、20年生では 17.2mm、30年生では 26.2mm、40年生では 35.5mm である。

Table. 57 Dry matter and water contained in stands

Age	10		20		30		40	
	A	B	A	B	A	B	A	B
Leaves	13.3	2.7	16.7	3.4	16.4	3.3	16.9	3.4
Stem	30.4	4.3	88.8	12.5	137.0	19.1	179.5	25.2
Root	6.0	1.0	9.9	1.4	35.0	3.9	49.1	6.9
Total	49.7	8.0	115.4	17.2	188.4	26.2	245.5	35.5

A; Dry matter, ton B; Water contained, mm.

3. 考 察

森林が成立し、しかも平均以上の成長をする降水条件を検討してみよう。スギの成長と雨量との関係は、すでにあきらかにしたように5—6月が危険期と推定された。危険期の水分供給量と成長との関係は、幼木の場合250mmに基準がおかれた。すなわち上長成長には250mm以下ではあまり影響がなく、それ以上の雨量が影響する。この期間の幼令林の蒸通発量は140mmであり、110mmの差がある。一方成木の場合、危険期の降雨に関する気象当量は380mmで、蒸散量よりもやはり多い。このように蒸散量に等しい水分供給量では、成長にとって十分とはいえないことがわかる。したがって、森林が成立するためにはTable. 56に示される吸水量だけを供給したのでは、十分な成長は期待できず、これよりかなり多くの降雨が要求され、有効水として900-1000mmは必要であろう。またTable 49に示すように、平年でも630mmの降雨が余剰水として流去されるから、スギ林が成立するための降水条件は1500-1600mmに達するものと考えられる。

摘 要

本研究は、スギの種子、苗木、幼木、成木の各成長ステージにおける水分経済を生理、生態的立場から検討したもので、次の4部に分けて論じた。

第1部 種子の水分経済の典型として、発芽における吸水問題を取りあげた。

第2部 苗木、幼木の水分経済として、生理的因子としての水と、生態的因子としての水を取りあげ、成長との関係等をあきらかにした。

第3部 成木の水分経済として、森林の水分収支、雨量と成長との関係等をあきらかにした。

第4部 結論として、水分要因にもとづく成長解析と、スギ及びスギ林の各成長ステージにおける水分経済を、水の収支と恒在備蓄という立場から解析した。

以上のことがらにつき内容を要約すると次のようになる。

第1部 種子の水分経済

I 種子の発芽にともなう吸水経過

種子の発芽までの経過にあわせて、I, II, III期に区分し、15, 25, 33°Cを27通りにくみあわせて、吸水におよぼす温度の影響をしらべた。吸水経過は3つの部分からなり、その1は最初の1—2日間で吸水が急に増す時期、その2はあまり変化を示さない時期、その3は発芽にともなって再び吸水がさかんになる時期である。2日目の種子の含水率は15°C 28%, 25 33°Cは32%で、高温程含水率も高いようだが、分散分析では有意差はみ

とめられなかった。発芽時の含水率は 15°C 73%、 25°C 87%、 33°C 76% で、適温状態で最も高いが有意差はみとめられなかった。発芽時の要水量は平均 1 粒あたり 3.5mg と計算された。

第 2 部 苗木、幼木の水分経済

I スギの含水率

含水率は組織が若い程高く、模式的には Fig. 4 に示すように、クローネの上日程、外周程、葉や幹の含水率は高い。

含水率の季節的变化は、1—2 年葉では 5—6 月が最も高く、2 番目の山は 1 年生葉では 8 月に、2 年生葉では 9 月にあらわれる。3 年生葉では系統的变化はみられない。クローネの部位別にしらべてみると、上部につく葉では 5 月から 6 月にかけて含水率が増すが、下部の葉には、このようなことがみられない。

土壤水分と苗木や幼木の含水率との関係は夏の測定では、Fig. 5 のようになった。1 年生葉は土壤の乾燥につれて葉の含水率も減少するが、土壤含水率が 10% になるまでは変化はすくなく、それ以上乾くと、葉の含水率も急に低くなる。2 年生葉もよく似た傾向をたどるが、凋萎するのは 1 年生葉より早い。根の含水率は、土壤が乾くにつれて、少しずつ増加し、凋萎点より少し湿った状態で最大に達し、それ以上乾くと急に低下した。

幼木の 1 年生葉は品種によって含水率がことなり、夏と冬の測定では、ウラセバルが最も高く、アヤスギ、メアサ、ホンスギ、ニンジンバの順に低くなる。

II スギの蒸散作用

蒸散作用に影響する環境因子として、温度、飽差、土壤水分、天候をとりあげて、統計的に解析した。蒸散量と温度及び飽差との間の相関係数は 0.89 でかなり高く、土壤水分とは 0.60 であった。温度との間には (1)、(2) 式が、飽差との間には (3) 式が、土壤水分との間には (4) 式が又両因子の交互作用を考えると (5) 式が得られた。

蒸散作用に影響する内的因子として、葉令、葉位、器官の大きさ、葉の含水率をとりあげた。1 年生葉、2 年生葉の蒸散量は冬はあまりちがわないが、夏は 1 年生葉があきらかに多い。クローネの位置とはあまり関係がないようだが、上部の葉の方が下部の葉よりいくらか多い。苗木の器官との相関は、Table. 14, Fig. 12 に示される。新葉重、新葉重/根重比との間の相関係数が高く、根重との相関はない。葉の含水率も蒸散作用に影響し、天候や品種によってかなりちがうことがわかった。相関係数は曇の日より晴れた日に、成長期より休眠期に高い (Table. 15)。葉令や葉位はあまり関係ないが、品種によってはかなりちがう (Table. 18, Fig. 16)。両者の相関を示す LMT 係数は、土地要求度と関係しているようだ。LMT 係数の高い品種 (ウラセバル) は土地要求度が高く、LMT 係数の低い品種 (ホンスギ、ニンジンバ) は土地要求度も低い。水分の供給を絶った場合の切枝の乾燥は、ホンスギ、アヤスギ、ヤブクグリは速く、メアサは遅い。この傾向は、耐乾性と関係があると考えられるが、今回の実験ではあきらかにならなかった。蒸散作用の季節的变化は、切枝では 7—8 月が最も高く、温度や飽差に似た変化を示す。5—9 月にファイトロンで定温に保って測定した苗木の蒸散量は、 15°C ではあまり変化しない。 20°C 、 25°C では 6—7 月に最大になるカーブを描く。 30°C 、 33°C では 7 月初と 8 月末から 9 月初めにかけて 2 つの山があらわれた (Fig. 19)。ライシメーターで測定した幼木の蒸散量は、7—8 月が最大で 6 月の約 2 倍である (Table. 25)。蒸散係数は温度によってことなり、ファイトロンで

測定した苗木の蒸散係数は、25°Cを最低とする凹カーブを描いた (Table.26)。

土壌水分と幼木の成長は、Table.33 : 34 に示される。上長成長は土壌水分の多い程いいが、肥大成長は、かならずしもそうとはいえない。成長周期におよぼす影響は成長期前半は正の相関がみとめられるが、成長期後半では負になる。このことは地温や土壌空気と関係しているようだ (Fig.20)。

スギ幼令林の蒸通発量は Table. 38 に示すように、成長があまりさかんでない5月と9月は、ヒノキ林とあまり変わらないが、6—8月には、スギ林の方が多い。褐色土に生育する1年生クモトオシの蒸散量は、8月1ヶ月に約40mmで、赤土や火山灰土より多かった (Table.29)。幼令林の水分収支は Table.42 に示されるが、蒸散量より蒸発量の方がかなり多い。夏の間に降水量の不足はおこらないと考えられる。

第3部 成木の水分経済

I 森林土壌の含水率

B_A, B_B, B_D, B_E型に属する土壌をえらび、秋から冬にかけての含水率をしらべた。分散分析をしてみると、土壌型、シーズンにはあきらかに有意差があり、深さにも有意差がみとめられた。

II スギ林の水分収支

森林の蒸散量は、ファイトトロンで測定された苗木のデーターからTable.46のように推定された。7月の蒸散量は172mmで、8月よりも多かった。切枝と幼木のデーターから求められた蒸散量の推定式は(64)(65)式である。阿蘇山麓で測定された34年生アヤスギ林の葉量は、ヘクタールあたり生重で36.7t、乾重で18.5tである。これらのデーターから推定された福岡、日田、飢肥、阿蘇地方の森林の蒸散量はTable. 48 のようになり、福岡では833mm、日田776mm、飢肥1000mm、阿蘇555mmとなった。福岡におけるスギ林の水分収支は、Table.49 に示される。乾燥年では夏の降水量は蒸通発量より少なく、平年でも8月に43mm少ない。降水量が不足する頻度はTable. 50 に示される。8月に不足する頻度は77%ときわめて高いことがわかった。平年での流出量は631mmで、これは降水量の約40%にあたる。

第4部 スギの林木並に林分の水分収支試算

10, 20, 30, 40年生スギ林木の水分収支は、Table.51 に示される。10年生スギ1年間の吸水量は2010kg、物質生産に利用されて体内に残るのは、わずかに4kgで、2006kgは蒸散によって失われる。20年生では4477kgが吸水され、8kgが残り、4469kgが蒸散され、30年生では6622kgが吸水され、10kgが残り、6612kgが蒸散され、40年生では9132kgが吸水され、12kgが残り、9120kgが蒸散される。又1本の木に恒在する水の量は10年生で26kg、20年生で101kg、30年生で241kg、40年生で419kgである。林分の1年間の水分収支は、Table. 56 に示される。10年生では610.1mmが吸水され、1.1mmが残り、609mmは蒸散される。20年生では764.5mmが吸水され、1.2mmが残り、763.3mmが蒸散される。30年生では749.6mmが吸水され、1.1mmが残り、749.5mmが蒸散される。40年生では773.5mmが吸水され、1.0mmが残り、772.5mmが蒸散される。又林分の中に貯えられる水分量は、10年生8.0mm、20年生17.2mm、30年生26.2mm、40年生35.5mmである。

参 考 文 献

1. ACKLEY, W. B : Seasonal and diurnal changes in the water contents and water deficits of bartlett pear leaves. *Plant Physiol.* 29, 445~448, 1954.
2. 安藤愛次 : キリのそだちと気象との関係. *日林誌* 42, 265~268, 1960.
3. 浅川澄彦 : チョウセンマツのタネの吸水経過. *日林誌*. 38, 125~129, 1956.
4. AZZI, G : (野口弥吉訳) 農業生態学, 1958.
5. BAKER, F. S : *Principle of Silviculture.* 1950.
6. BATES, C. G : Physiological requirements of rocky mountain trees. *Jour. Agr. Res.* 24, 97~164, 1923.
7. BIALOGLOWSKY, J : Effect of humidity on transpiration of rooted lemon cuttings under controlled conditions. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 33, 166~169, 1936.
8. BREWSTER, O. R : Annual rings tree growth. *U. S. Mo. Weather Rev.*, 33, 1905.
9. BRIGGS, L. J. and SHANTZ, H. L : Relative water requirement of Plants. *Jour. Agr. Res.*, 3, 1~64, 1914.
10. ————— : Hourly transpiration rate on clear days as determined by cyclic environmental factors. *Jour. Agr. Res.*, 5, 583~649, 1916.
11. BÜSGEN, M : *Waldbäum.* 1927.
12. 千葉宗男・加藤退介・中村義司 : 林地灌水の効果に関する研究 (林地処理による造林木の成長促進に関する研究, 佐藤敬二編). 1963.
13. CONALD, H. S : Tree growth in the vicinity of Grinnell, Iowa. *Jour. of Forestry*, 16, 1918.
14. CRAFT, A. S., CURRIER, H. B. and STOCKING, C. R : *Water in the Physiology of Plants.* 1949.
15. DANIEL, T. W : The comparative transpiration rates of several western conifers. *Univ. Calif.*
16. DARWIN, FR : On a method of studying transpiration. *Proc. R. Soc. London. B.* 190, 531~621, 1914 (cited by Maximov)
17. DOUGLASS, A. E : Climate cycle and Tree-growth. II, A study of the annual rings of tree in relation to Climate and Solar activity. *Carnegie Inst. Wash.* 1928.
18. FRASER, D. A : Ecological studies of forest trees at Chalk River, Ontario, Canada. II, Ecological conditions and radial increment. *Ecology.* 37, 777~789, 1956.
19. ————— : Tree growth in relation to soil moisture. (*Tree Growth*, Kozlowsky ed.) 1962.
20. FUKUDA, T. and KAKU, S : Hydration studies of soybeans on the soil moisture slope. *Bot. Mag. Tokyo*, 65, 267~272, 1952.
21. ————— : Drought resistance and constancy of osmotic ascension caused by wilting in soybeans. *Bot. Mag. Tokyo.* 66, 57~62, 1953.
22. 伏谷伊一 : 森林土壌の含水量について. *日林誌* 34, 216~219, 1953.
23. GAISER, R. N : Readily available water in forest soils. *Soil Sci. Am. Proc.*, 16, 334~338, 1952.
24. GIBBS, R. D : Studies of wood. II. The water contents of certain Canadian trees and changes in the water-gas system during and flotation. *Canadian Jour. Res.* 12. 727~760, 1935.
25. ————— : Studies in tree physiology I. General introduction. Water content of certain Canadian trees. *Canadian Jour. Res.*, c 17, 460~482, 1939.
26. ————— : Patterns in the seasonal water content of trees. (*The Physiology of Forest Tree.* Thimann ed) 1958.

27. 郷正士：二・三林木種子の吸水経過。東大演報, 39, 55~60, 1951.
28. ——：水がクロマツのたねに入る場所と速さ。東大演報, 41, 51~56, 1951.
29. ——：平松遙：タネのうれかたと発芽。東大演報48, 103~114, 1956.
30. ——：タネの発芽と乾燥（育林学新説 中村教授還歴記念事業会編）。1960.
31. GREGORY, F.G., MILTHORPE, F.L., PEARSE, H. J., and SPENCER, H. J : Experimental studies of the factors controlling transpiration. II. The relation between transpiration rate and leaf water content. J. Exptl. Botany, 1. 15~28, 1950.
32. 畑野健一：ハゼノキ種子の硫酸処理による発芽促進について。日林誌, 32, 185~188, 1950.
33. HATANO, K : On the absorption of water by seed of *Larix kaempferi* and *Pinus thumbergii*. Jour. Jap. Forest, 33, 426~430, 1951.
34. HEINICKE, A. and CHILDERS, N. F : The influence of the water deficiency in photosynthesis and transpiration of apple leaves. Am. Soc. Sci Pro., 33, 155~159, 1935.
35. HILEY, M.A : The annual of applied biology. 1923.
36. 平田徳太郎・神保幸雄：樹木の通発水量測定試験成績。森林気象集報, 10, 11, 12, 1925—1932
37. 細川隆英他：生態学汎論, 1963
38. 藤本幸司：細胞液の季節変化に関する研究（I）。日林講, 69, 333, 1959
39. HUSTICH, I : The scotch pine in north most Finland its dependens on the climate in the last decades. Acta Bot. Fennica. 42, 4~75, 1948.
40. 飯塚一郎：早春におけるびわの水分含量と天気との関係について。農業気象, 14, 121—123, 1950
41. 池田茂：砂丘地における樹葉水分と気象との関係。北大演報, 21, 1962
42. 石崎厚業：品種の上からみた小国のスギ林業。林業技術, 189, 29—37, 1957
43. IVANOV, L. V : Uber die Transpiration der Holzgewächs im Winter, Ber. Deut. Bot. Gesell., 42, 44~49, 210~218, 1924.
44. 岩田進午：作物栽培上における圃場容水量の意義〔I, II〕。農及園, 38, 1361—1364, 1504—1508, 1963
45. JAZEWITSCH, W : Zur Klimatogischen Auswertung von Jahrringkurven. Forstwiss. centllallb-latt. 5~6 1961.
46. 門田正也：クロマツの蒸散量について。東大立地自然科学研究所報告 4, 4—48, 1950
47. 金子章・辻田昭夫：造林作業の適期に関する研究（第IV報），ヒノキ幼令林の吸水量と上長生長および根の伸長生長の年変化について。日林講, 71, 164—166, 1961
48. 加藤亮：土の乾燥がカラマツの水分生理におよぼす影響。林試北海道支場業務報告（特別報告），2, 75—80, 1950
49. ——：カラマツの水分経済。日林講, 63 164—166, 1954
50. 加藤退介：林地灌水の効果に関する研究。1961
51. 川畑幸夫編：水文気象学。1961
52. 川口武雄：森林気象学。1956
53. 河田杰：四季を通ずる降水量の配分状態がスギ，ヒノキの分布に及ぼす影響。1940
54. 香山信夫：主要造林樹種の幼苗時における蒸散作用（予報）。日林誌, 24, 1—19, 1942
55. 黒岩菊郎・吉野遼一・高橋五郎：キリの日肥大成長曲線〔II〕，成長期間中の変化。日林誌, 40, 139—145, 1958
56. 木梨謙吉・吉筋正二・下野園正：土壌B層のMEとスギの樹高。日林九支講, 13, 37—39, 1959
57. ——：九州大学柏屋演習林スギ，ヒノキの土壌による地位指数曲線。日林講, 70, 77—79, 1960
58. 吉良竜夫編：植物生態学（2）。生態学大系第II巻 上, 1960

59. KITTREDGE, J : Forest influence. 1948.
60. ————— : The influence of the forest on the weather and other factors.(Forest influence, FAO.) 1962
61. 瀨瀬理一郎 : 植物水分生理, 1932
62. —————植物生理学, 1942
63. KOZLOWSKY, T. T. and GENILE, A. C : Influence of the seed coat on germination, water absorption and oxygen uptake of eastern white pine seed. Forest Sci. 5, 389~395, 1959.
64. ————— : Tree Growth. 1962.
65. KRAMMER, P. J : Plant and soil water relationships. 1949
66. ————— • and WIEBE, H. H : Longitudinal gradients of P^{32} absorption in roots. Plant Physiol. 27, 661~672, 1952.
67. ————— : Transpiration and the water economy of plants. 1959.
68. ————— • and KOZLOWSKY, T. T : Physiology of trees, 1960.
69. LAUSTALT, A. J : Influence of soil moisture conditions on apparent photosynthesis and transpiration of pecan leaves. Jour. Agr. Res. 71, 519~532, 1945.
70. LIVINGSTON, B. E : The relation of desert plants to soil moisture and to evaporation. 1906. (cited by Kramer)
71. ————— • and BROWN, W. H : Relation of the daily march of transpiration to variations in the water content of foliage leaves. Bot. Gaz. 53, 309~330, 1912.
72. LLOYD, F. E : The relation of transpiration and stomatal moving to the water content of the leaves in *Fouqeria splendens*. Plant World, 15, 1~14, 1912.
73. LODEWICK, E : Effect of certain climatic factors on the diameter growth of longleaf pine. Jour. Agr. Pros. 41, 1922.
74. 真下育夫 : 森林土壤の理学的性質とスギ, ヒノキの成長に関する研究. 林土調, 11, 1960
75. ————— : 森林土壤の理学的性質とスギ, ヒノキの成長に関する研究. 日林講, 71, 4~9, 1961
76. MARTIN, E. V : Studies of evaporation under controlled conditions. 1953.
77. 松原茂・奥田節夫・川合信子 : 波状砂面からの蒸発速度について. 農業土木研究 25, 177~178, 1957
78. 松川篤治 : 一, 二林木種子の発芽試験, 生態学研究. 2 25~28, 1936
79. MAXIMOV, N. A : (野口弥吉監修) 植物と水, 1959
80. MEYER, A. F : The element of Hydrology. 1914.
81. ————— : The element of Hydrology. 2nd ed. 1928. (cited by Kittredge.)
82. MEYER, B. S., ANDERSON, D. D. and BONING, R. H : Introduction to plant Physiology. 1960.
83. MIGITA, K., KAWANA, A. and TAKAHASI, M : Absorption of water by the seeds of the Japanese red pine (*Pinus densiflora*), in the aqueous media with various concentrations of oxygen. Jap. J. Forest. 38, 465~466, 1956.
84. 三原義秋 : 農業気象, 1961
85. 中島広吉 : カラマツの直径生長と気温, 降水量との相関. 日林誌, 36, 1925
86. 中村教授還暦記念事業会 : 育林学新説, 1955
87. 中村義司 : スギの蒸散作用の推定. 日林九支講 14, 6~7, 1960
88. ————— : 林分の水分収支に関する研究 (2) 雨量一生長量関係の解析. 日林九支講15, 78~79, 1961
89. ————— • 佐藤敬二 : 林分の水分収支に関する研究 (3). 九大演集報, 17, 51~58, 1962

90. ———— : 林分の水分収支に関する研究 (4). 日林講, 73, 188—190, 1962
91. ———— : 林分の水分収支に関する研究 (5). 日林九支講, 16, 105—107, 1962
92. ———— : 林分の水分収支に関する研究 (6). 日林九支講, 17, 101—102, 1963
93. 西日本気象協会, 福岡県の気象, 1960
94. 沼田真・三寺光雄: マダケ林における水分経済, 竹林の生態学的研究 (第9報). 日林誌, 43, 12, 3111—319, 1961
95. OCHI, H: The preliminary report on the osmotic value, permeability, drought and cold resistance of mosses. Bot. Mag. Tokyo. 65, 10—12, 1952.
96. ———— : Autecological study of mosses in respect to water economy. I. On the minimum hydrability within which mosses are able to survive. Bot. Mag. Tokyo. 65, 112—118, 1952.
97. 岡田幸郎: 北山台スギにおける品種別の小枝の吸水と乾燥, 日林誌, 40, 519—520, 1958
98. ———— ・小林隆: スギの葉の乾燥速度. 日林誌, 40, 81—82, 1959
99. 岡崎文彰: スギの水分生理 (スギの研究 野口弥太郎編), 1950
100. ———— : 土壌含水量がスギおよびヒノキの稚苗の成育ならびに体内水分生理に及ぼす影響. 日林誌, 33, 323—325, 1951
101. ———— ・柴田信男・和田茂彦: 稚樹の耐乾性に関する研究 (第II報), 土壌水分が稚樹の耐乾性に及ぼす影響. 日林講, 63, 161—164, 1954
102. ———— : 林木の生理, 1960
103. 小野 学: 土壌型と樹種別, 品種別生長量との関係について, 林業技術, 187, 27—30, 1957
104. 大内 晃・八木下弘: 秋田地方における杉の樹高生長と腐殖層の厚さ及び含水量との関係, 林曹会報, 313, 1943
105. PAPADAX, J: (沼田真・山本進訳) 世界農業地理, 1962
106. PEARSON, G. A: The relation between spring precipitation and height growth of yellow pine saplings in Arizona. Jour. Forestry. 16, 1918.
107. RABER, O: Water utilization by trees, with special reference to the economic forest species of the north temperature zone. U. S. Dept. Agr. Misc. Pub. 257, 1937.
108. RENNER, O: Beiträge zur Physik der Transpiration. Flora. 1910. (cited by Kittredge.)
109. RICHARDS, L. A. and WADLEIGH, C. H: Soil water and plant growth. (Soil physical condition and plant growth, Shaw, B. T. ed.) 1952.
110. ロージェ, A. A (山崎不二夫訳) 植物と水, 1963
111. ROE, H. B: Moisture requirement in agriculture. 1950.
112. ROSE, J. J: Transpiration capacity of coniferous seedling and the problem of heat injury. Jour. Forestry. 30, 381—395, 1932.
113. 齊藤考蔵: 樹木生理, 1958
114. 坂口勝美: 育苗 (林学講座), 1957
115. 佐藤敬二: 造林上より見たる樹木の蒸騰作用. 山林, 547, 2—15, 1928
116. ———— : 実践林木育種 1957
117. ———— : 日田, 小国, 八女の栽培林業. 林業技術, 219, 42—45, 1960
118. SATO, T: Effect of wind on transpiration of new and old leaves of some trees. Bulletin, Tokyo Univ. Forests. 36, 29—34, 1948.
119. 佐藤大七郎・名村二郎: 土がかわくにつれてアカマツのマキツケ苗の水分関係はどうかかわるか 日林誌, 35, 1953
120. 佐藤大七郎・福原楯勝: さしつけてからしばらくのあいだのサシホの水分関係. 東大演報, 45,

89—102, 1953

121. —————・郷正士：土およびサトウミズの吸収力とタネの発芽。東大演報，46，159—168，1954
122. —————・スギ，ヒノキ，アカマツのマキツケナエの耐乾性。日林講，67，12—18，1957
123. —————・森林の蒸散量，科学，28，205，1958
124. SCHNEIDER, G. W. and CHILD, N. F : Influence of soil moisture on photosynthesis, respiration and transpiration of apple leaves. *Plant Physiol.* 16, 565—583, 1941.
125. SCHUBERT, A : Untersuchungen über den Transpirationstom der Nadelhölzer und den Wasserbedarf von Fichte und Lärche. *Tharandter Forstl. Jahrb.* 90, 1940 (cited by Kittredge)
126. 芝本武夫：スギ，ヒノキ苗木の生長と土壤水分に関する研究。日林東北支講，1941
127. 柴田信男：スギ林とその環境（スギの研究，佐藤弥太郎編）1950
128. 下野園正・長友忠行：幼令造林木の養分含量について。日林九支講，16，99—101，1962
129. 白沢保美：母樹の老幼及産地が所産林木の生長に及ぼす影響。1929
130. SHREVE, F : Growth in tree and massive organs of plants. *The growth record in trees.* Wash. D. C. 1924.
131. SHULL, C. A : Temperature and rate of moisture intake in seeds. *Bot. Gaz.* 69, 77, 262—279, 361—390, 1920.
132. SHULL, C. A and SHULL, S. P : Temperature coefficient of absorption in seeds of corn. *Bot. Gaz.* 1924.
133. SNEDECOR, G. W : *Statistical methods*, 5th ed. 1961.
134. STEWART, M. N : Relation of Precipitation to tree growth. *U. S. Weather Rev.* 41, 1913.
135. STICKEL, P. W : The measurement and interpretation of forest-fire weather in the western Adirondacks. *N. Y. State. Cal. Forestry Tech. Pub.* 34, 1931.
136. STILES, I. E : Relation of water to the germination of corn and cotton seeds. *Plant Physiol.* 23, 201—222, 1948.
137. ———— : The relation of water to the germination of bean seeds. *Plant Physiol.* 24, 540—545, 1949.
138. 只木良也・四手井綱英：森林の生産構造に関する研究（I）。日林誌 42，427—434，1960
139. 高原末基：板打の実際 1961
140. 田中波慈女：森林の環境因子（林業技術叢書），1950
141. 種田行男：蒸通発量に関する実験的研究（III）。農業土木研究 25，211—214，1947
142. ———— : 蒸通発量の測定方法。農及園，32，1379—1381，1957
143. ———— : 畑地かんがい（理工文庫），1958
144. 玉手三寿稔：土壤中の水分と気象要素との関係。林学会雑誌，10，1929
145. TAZAKI, T : Studies on the dehydration resistance of higher plants. II. Theoretical consideration of dehydration resistance *Bot. Mag. Tokyo.* 73, 205—211, 1960.
146. ———— : Studies on the dehydration resistance of higher plants, III. Discussions on general analysis focussed on the dehydration resistance of pine yearlings. *Bot. Mag. Tokyo.* 73, 269—277, 1960.
147. THORNTHWAITE, C. W. and HOLZMAN, B : Measurement of evaporation from land and water surface. *U.S. Dept. Agr. Tech. Bull.* 817, 1942.
148. ———— : An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38, 55—94, 1948.
149. ————・KENNETH HARA, F : Climatic classification in forestry. *Unasyuva*, 9,

- 51~59, 1955.
150. 戸刈義次・山田登・林武編：作物生理講座（3）. 水分生理編, 1961
 151. 鳥潟博高：果樹の蒸通発量と水分不足度（1）. 農及園, 38, 1049-1053, 1963
 152. ————：果樹の蒸通発量と水分不足度（2）. 農及園, 38, 1204-1208, 1963
 153. 外山三郎：林木育種に関する知見, 林試研報, 66, 1954
 154. TRYON, E. H. CANTRELL, J. O. and CARVELL, K. L : Effect of precipitation and temperature on increment of yellow poplar. *Forest Sci.* 3, 32-34, 1957.
 155. 塚原初男：スギの挿木品種に関する研究（第1報）. 新挿木品種ニンジンバについて, 日林九支講, 12, 1959
 156. ————：スギの挿木品種に関する研究（第6報）. 成長型について, 日林九支講16, 143-145, 1962
 157. 塘隆男・原田洸：林木の養分含量に関する研究（第1報）, 年令別にみたスギの重量と肥料三要素の含有量について. 日林講, 66, 75-77, 1956
 158. VEIMEYER, F. J. and HENDRICKSON, A. E : Soil moisture conditions in relation to plant growth. *Plant Physiol.* 2, 71-82, 1927.
 159. ———— • and ———— : The relation of soil moisture to cultivation and plant growth. *Proc. First Intern. Cong. Soil Sci.* 1927. 3, 498-513, 1928.
 160. ———— : *Encyclopedia of plant physiology*, (Soil moisture, Ruhland ed.) 1956.
 161. 渡辺章：ハゼノキ種子の吸水について. 東大演報, 44, 7-14, 1953
 162. WEAVER, J. E. and Mogensen, A : Relative transpiration of coniferous and broadleaved trees in autumn and winter. *Bot. Gaz.* 68, 393-424, 1919.
 163. YAMAGUCHI, S : Physiological studies on the germination of yezo spruce seed. *Jour. Facul. Age. Hokkaido Imp. Univ. Sapporo.* 48, 1-1148, 1942.
 164. 山岡義人：森林の全蒸通発量測定の研究（その6）. 通発率と気象条件との実験的研究 林試研報, 91, 77-116, 1956
 165. 山谷考一：ヒバ林土壌水分量の季節的变化. 日林誌, 33, 97-101, 1951
 166. 汰木達郎：林木の物質生産に関する研究（V）, スギの幹, 枝, 葉の配分について. 日林九支講, 15, 76-77, 1961.
 167. ZON, R. : Forests and water in the light of scientific investigation. U. S. Nat. Waterways Comm. Final Rpt. 1927. (cited by Kittredge).

Study of the Water Economy of Trees and Tree Stands of SUGI
(*Cryptomeria japonica* D. Don.)*

Yoshiji NAKAMURA

Résumé

This paper reports the experimental results on the water economy of seeds, seedlings, young trees and mature trees of Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don.) It consists of the following four parts. In part 1, the process of water absorption by seed was investigated as one of the typical themes of water relations of seed. Part 2 is concerned with the water relations of seedlings and young trees which is studied ecologically and physiologically. There is cleared the water budget of young stands by the use of the Lysimeter. In part 3, the water budget of mature stands are cleared from the climatic factors such as temperature and saturation deficit. There is also discussed the relation between tree growth and precipitation. The last part is concerned with a tentative calculation of the water budget of different stages relating to the growing process of trees and tree stands.

Part 1. The water economy of seeds

Process of the water absorption by seeds

The relation between the process of water absorption by seed and temperature was studied in the Phytotron, Kyushu University. Temperature treated are 15, 25, and 33°C. Germination test was held by the ordinary method in the autumn, 1963. The moisture content of seeds on the two days since the start of the test are 28% at 15°C and 32% at 25-33°C, and the moisture content of seeds at the time of germination are 73% at 15°C., 87% at 25°C., and 76% at 33°C as shown in Table. 1 and Fig. 1,2,3. It is calculated that the water amount required for the germination of seed is about 3.5 mg. per grain.

Part 2. The water economy of seedlings and young trees

I. Moisture content

The distribution of moisture content in the body of a young tree of Akaba (Clone of *Cryptomeria*) was determined on a clear day in early April. Result is shown in Fig. 4. It seems that as a general rule, the moisture content is higher in the younger part than in the older part. The seasonal changes of the moisture content are shown in Table. 3 in the case of Ayasugi and Yabukuguri (Clone of *Cryptomeria* respectively). The maximum moisture contents of 1 and 2 year leaves were observed in May to June, and 3 year leaves did not show any systematic change. Relation between soil

* This paper is based on a thesis presented to Kyushu University in the requirement for the Ph. D. degree in Agriculture.

moisture content and moisture content of several parts of seedlings were determined on fine days in summer. Results are shown in Fig. 5 and Table. 5, 6. The moisture content of 1 year leaves decrease following soil drying process, but it is not clear above the wilting point. 2 year leaves show resemble tendency, but it wilt faster than 1 year leaves. The moisture content of stem and root increase gradually following soil drying process, and decrease rapidly under wilting point.

II. Transpiration

Some problems concerning transpiration were studied by the use of six clones of *Cryptomeria*, namely, Ayasugi, Honsugi, Measa, Ninjinba, Urusebaru and Yabukuguri. They are famous clones in the northern part of Kyushu Island. Measurements are made by volumatic and gravimetric methods, and results are as follows.

Environmental factors affecting transpiration

The relation between transpiration and several environmental factors were analysed statistically. The correlation coefficient between transpiration and temperature is 0.89, if logarithmic transformation is carried out. And it is highly significant at 1% level (Fig. 7). Regression equation is as follow,

$$\log T = -0.0088 + 0.0125 \log t \quad (2)$$

where T is transpiration (cc/100g/day), and t is temperature ($^{\circ}\text{C}$). If logarithmic transformation is carried out, the correlation coefficient between transpiration and saturation deficit is 0.89 and it is highly significant at 1% level (Fig. 10). Regression equation is as follow,

$$\log T = 0.0003 + 0.0088 \log Hd \quad (3)$$

where Hd is saturation deficit, mmHg. If logarithmic transformation is carried out, the correlation coefficient between transpiration and soil moisture content is 0.60 and it is significant at 5% level (Fig. 11). Regression equation is as follow,

$$\log T = 0.0068 + 0.0040 \log x \quad (4)$$

where x is soil moisture content, %. It is concluded that the transpiration of Sugi can be estimated by the data of the climatic factors.

Plant factors affecting transpiration

The relation between transpiration and weight or ratio of the several parts of seedlings were investigated from May to September, And results are shown in Table. 14 and Fig. 12. There is highly correlation between transpiration and the leaf weight, and it is highly significant at 1% level. Regression equation is as follow,

$$\log T = 2.1171 + 1.4075 \log w \quad (9)$$

where w is new leaves weight, g.

Relation between transpiration and the leaf moisture content were studied by the use of cuttings of young trees in dormant and growing season. The correlation coefficient between transpiration and the leaf moisture content on fine day is higher than that on cloudy day both season (Table. 15). Leaves of the upper part of crown contain more moisture than those of the lower part. And transpiration from the

former is larger. But the relation between transpiration and the leaf moisture content is not significant difference among the leaves of the upper, the middle and the lower parts of crown. (Table.16). Transpiration of 1 year leaves is more than that of 2 year leaves in summer, but less than that of from the latter in winter. According to the analysis of covariance, there is not significant difference with respect to the regression coefficient, but significant difference with respect to the adjusted mean among the regression equations (Table. 17) There are highly significant difference among the clones regarding the relation between transpiration and the leaf moisture content (Table. 18, Fig. 18). The regression coefficients of such relationship of Urasebaru and Measa are higher, and those of Ayasugi and Yabukuguri are in between. The distribution of clones by the regression coefficient is quite similar to that by the requirement for the soil fertility. It is concluded that if regression coefficient is higher, the requirement for the soil fertility is higher.

The drying process of leaves were investigated by the use of cuttings. The drying speed of 2 year leaves is faster than that of 1 year leaves in winter (Table. 19). Leaves of the upper, the middle and the lower parts of the crown show similar tendency as regards drying process, and not significant difference is observed (Table.20). The analysis of covariance show that there are highly significance observed among the clones as regards the drying process of 1 year leaves (Fig. 17, 18).

The relation between transpiration and constant temperature were determined by the use of the seedlings of Ayasugi in the Phytotron. Temperature treated are 15, 20, 25, 30, and 33°C. It is cleared that transpiration march seasonally under constant temperature (Fig.19).

The relation between transpiration coefficient and temperature was studied by the use of the seedlings of Ayasugi. Temperature treated are same as above. Maximum transpiration coefficient is 991 at 33°C and minimum is 511 at 25°C (Table. 26). There are distinct seasonal changes during growing periods. And transpiration coefficient is lower in May to June, and higher in July to August (Table. 27).

III. Relation between soil moisture and tree growth

The growth of young tree in wet, moist, and dry soil were measured in the Lysimeter in 1961, 1962, and 1963. The size of the Lysimeter is each one meter in breadth, length and depth respectively, and soil used is sandy black soil in A-horizon and redish soil in B-horizon. Water is supplied periodically by the watering pot, and the depth of water irrigated is shown in Table. 30. The wet soil was maintained over the moisture equivalent and the dry soil was kept under that during growing season. Height growth is best on the wet soil, but radial growth is best on the moist soil (Table. 33, 34). The relation between soil moisture and height growth periodicity was studied by the use of Ayasugi and Yabukuguri. Results is shown in Fig.20. Generally speaking, the peak of height growth occur in May to June and September in the northern part of Kyushu Island. Pattern of the growth periodioity differ following

location, climatic condition and so on. As shown in Fig. 20, daily growth rate of Sugi is higher on the wet soil than on the dry soil in May to June, but reversely lower on the wet soil than on the dry soil in September. It seems that the observed phenomenon is related to soil air and soil temperature as well as soil moisture.

IV. Water budget of young stands

Water budget of young stands were studied by the use of three kinds of the Lysimeter during growing season in 1963. Results are shown in Table. 38, 39, 40, and 42. As shown in Table. 42, monthly evapo-transpiration is about 50 mm in mid-summer, and transpiration is 38 mm in same season. And water deficiency is not occurred. Water budget depend on tree species, soil factors, locations and so on. Sugi planted in brown soil is more transpired than that on red or black soil (Table.39).

Part 3. The water economy of mature trees

I. Moisture content of forest soil

Seasonal changes of the soil moisture content were measured in BA, BB, BD, and BE of the forest soil types. As cleared in Table. 44, soil type and season are highly significant difference at 1% level and soil depth is significant at 5% level.

II. Water budget of mature stands

It is cleared that as mentioned earlier, transpiration by tree can be estimated with temperature and leaf weight. Transpiration from mature stand is estimated by the data of the seedlings measured in the Phytotron (Table.46). Maximum transpiration occur in July and it is 172 mm. Regression equations between transpiration and temperature are obtained in No. 64 and 65 by the results of the cuttings, seedlings and young trees. Leaf weight measured at the roof of the Aso mountain are 36.7 ton in fresh weight and 18.5 ton in dry weight per hectare. Transpiration loss from mature stands in Fukuoka, Hita, Obi and Aso districts are estimated in Table. 48 and Fig. 21. Annual transpiration loss are 844 mm in Fukuoka, 776 mm in Hita, 1000 mm in Obi and 555mm in Aso district. Water budget in Fukuoka prefecture is shown in Table. 49. In drought year, 1939, precipitation was deficit to evapo-transpiration in May, July, August and September. And deficit amounted to 400 mm. A deficit of 122 mm occurred in growing season during rainy year.

III. Relation between precipitation and tree growth

Relation between monthly precipitation and annual growth of Sugi were analysed. Materials are Ayasugi at age of 35 year, Yabukuguri at age of 25 year and Misho (seedling plant) at age of 35 year. Those samples were obtained from the Kyushu University Forest in kasuya district in Fukuoka prefecture. Methods are as follows. 1; Annual growth are calculated by the stem analysis. 2; Mean annual growth ratio are calculated by the least square method. 3; Growth-Deviation-Ratio are calculated by following equation,

$$GDR = \frac{O-E}{E} \times 100$$

where *GDR* is Growth-Deviation-Ratio (%), *O* is observation (annual growth ratio) and *E* is estimation (mean annual growth ratio).

Results are as follow. There exist significant correlation between *GDR* and precipitation in May and June. Therefore, it can be decated that the precipitation in May and June makes a controlling factor. Consequently, author concluded that May and June are critical periods relating to the growth of Sugi. And meteorological equivalent are 120 mm in May and 250-260 mm in June.

cf. The Reports of the Kyushu University Forests. 17 (51-58) 1962.

Part 4. The Tentative Calculation of Water Budget of Trees and Tree Stands.

The water budget of tree at 10, 20, 30, and 40 year old are calculated as Table. 51. The amounts of water absorbed by tree in a year are 2010 kg at 10 year old, 4477 kg at 20 year old, 6622 kg at 30 year old, and 9132 kg at 40 year old. The larger parts of those amounts are transpired from leaves. The amount of water utilized to produce organic matter are 4 kg at 10 year old, 8 kg at 20 year old, 10 kg at 30 year old, and 12kg at 40 year old. The total volume of water present in the body of a tree are 26kg at 10 year old, 101 kg at 20 year old, 241 kg at 30 year old, and 419 kg at 40 year old (Table. 52). The water budget of tree stands are calculated as Table. 56. The depth of water absorbed by tree stands in a year are 610.1 mm at 10 year old, 764.5 mm at 20 year old, 749.6 mm at 30 year old, and 773.5 mm at 40 year old. The larger parts of those amounts are transpired from the crown. The depth of water utilized to produce organic matter are only 1.0-1.2 mm in a year. The total depth of water present in the body of the stands are 8.0 mm at 10 year old, 17.2 mm at 20 year old, 26.2 mm at 30 year old and 35.5 mm at 40 year old.