

(研究資料)

森林の全通発量測定の研究(その6)

通発率と気象条件との実験的研究*

山 岡 義 人⁽¹⁾

1. 緒 言

"その5"において詳細に吟味したように、ポトメーター法によつて求められた通発率の値は、立木の自然状態における通発率の値とよく一致するから、この方法によつて通発率と気象条件との関係の実験的研究をおこなうことにした。通発率が周辺条件によつて影響され、日周期性を有することについては、すでに BRIGGS and SHANTZ⁵⁾, SAYRE³⁶⁾, CRIBBS³⁾, DOLE¹¹⁾, WILSON⁴³⁾, BLAYDES⁴⁾, MAYER²²⁾らによつて報告され、SHAPIRO and DEFOREST⁴⁰⁾ は8種類の chaparral plants の通発率を cobalt chloride paper method (BAKKE²⁾, LIVINGSTON and SHREVE¹³⁾) を用いて測定し、それと周辺条件との間に関係のあることを認めている。またわが国においては、門田¹⁴⁾のクロマツについての観測の中にもこの日周期性が現われている。また、ヤマモモ (*Myrica rubra*) について一昼夜にわたつて通発率の観測をおこなつた筆者の実験結果** においてもやはりこの日周期性が認められた。

このように通発率は周辺条件の変化にともなつて変動するものであることがわかる。そこで通発率に直接影響を及ぼすと考えられるおもな気象因子をあげると、太陽輻射、気温、湿度および風速となる。従来、これらの各因子が通発率に及ぼす影響の測定については、それぞれいくつかの研究結果が報告されている。

太陽輻射強度の影響については、ARTHUR and STEWART¹⁾, MARTIN¹⁹⁾らの研究があり、MARTINは鉢植にされた6組の *Helianthus annuus* を太陽光線の透過力の異なるテントを用いてそれぞれ異なつた輻射強度のもとに通発率の同時観測をおこない、通発率と輻射強度との間に直線関係が存在することを報告している。また、光波長の差による影響については、LECLERC du SABLON¹⁶⁾, IVANOV und THIELMANN¹³⁾, および LEPESCHKIN¹⁷⁾らの研究があり、LECLERC du SABLONは輻射による通発率の速進作用を大別して葉の加熱効果と protoplasm の permeability の変化とに帰し、IVANOV und THIELMANNは青紫色の光のもとでは通発率が赤黄色の光をあてた場合に比べて 50~60 %増加されるとしている。また LEPESCHKINによれば、*Elodea* の葉の protoplasm の permeability は全太陽光線の 10 %までのメチレン青の光の増加によつては増加するが、10 %以上の増加に対しては大なる影響を受けないと報告している。

つぎに気温の影響については MEYER²¹⁾, THORNTWHAITE and HOLZMAN⁴²⁾, THORNTWHAITE⁴¹⁾ら

* 本論文は当場の委託研究によるものである

**未発表

(1) 山口大学助教授・理学博士

の報告があり、これらの研究ではほぼ直線関係によつて通発量と気温および通発量と蒸発量との和と気温との関係が表わされている。しかし、Lodgepole pine, Engelmann spruce, Douglas fir および Western yellow pine について ROESER²⁷⁾ がおこなつた室内実験の結果では、気温の上昇とともに通発率は加速的に増加する傾向が現われている。

関係湿度の影響については、MARTIN²⁰⁾, BIALOGLOWSKI³⁾ らの研究があり、通発率と関係湿度とは直線的に比例する結果になつている。しかし、DANIEL¹⁰⁾ が 5 種類の樹木について実験した結果では直線関係になつていない。

風の影響についても、RENNER²⁶⁾, SEYBOLD²⁷⁾⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾, WRENGER⁴⁵⁾, WILSON and LIVINGSTON⁴⁴⁾, 中山および門田²⁴⁾⁽²⁵⁾, および佐藤²³⁻³⁵⁾ らの研究がある。RENNER の実験によれば、*Rhododendron hybridum* の通発量に及ぼす風の影響は散光下では不明瞭であつた。また SEYBOLD は室内実験の結果、クチクラ蒸散の多い植物では通発量は風によつて増加するが、気孔蒸散を主とする植物では風のための影響は小さいと述べている。WRENGER は *Helianthus annuus* 等 38 種類の植物について風の影響を実験室内で測定した結果、通発量は風のために 10~15 分後には 12~150 %, 植物特有な最高通発量まで上昇し、しだいに低下することを示している。また、中山および門田が茂道松についておこなつた実験結果では、一日中の時期によつて通発量に及ぼす風の影響が異なり、午後では晴天日には通発量は風のために低下するが、曇天日には逆に促進されると述べている。WILSON and LIVINGSTON は主としてヤナギについて、また佐藤²⁸⁾ はスギについて風速をかえた場合の通発率の変化の遅れを測定している。佐藤はまたスギなどについての風の影響は、新葉のほうが旧葉よりも大であると述べ³⁰⁾、また模型実験等をもおこなつてい

る³³⁾。

このように通発率が各気象因子の変化によつて受ける影響についての研究報告は多い。しかし、いまだ特定の気象条件下における通発率を算定するに充分な総合的結果は得られていない。そこで筆者は、ヤマモモ (*Myrica rubra*) およびスギ (*Cryptomeria japonica*) について、それらの通発率の算定に必要な総合的結果をうるために一連の実験をおこなうに至つたのである。

2. 自然条件下の通発率

実験室内における測定を開始する前に、自然条件下の通発率が周辺条件の変化に伴つてどのように変化するかをみることは、通発率と周辺条件との関係の概略の知識をうるために必要である。そこで筆者は、ヤマモモの切枝について何回かの戸外実験をおこなつた。そのうちの 2 例を次に示す。

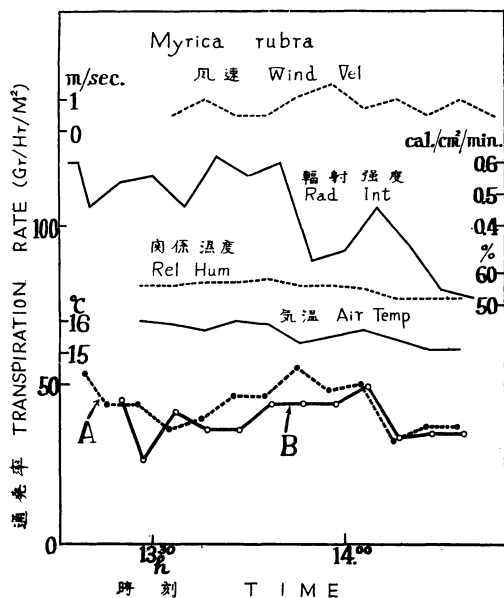


Fig. 1 自然条件下の通発率と周辺条件の時間的経過を示す、1951 年 12 月 4 日測定、戸外実験

Time march of transpiration rate and environmental factors under natural conditions. Dec. 4, 1951, field experiment.

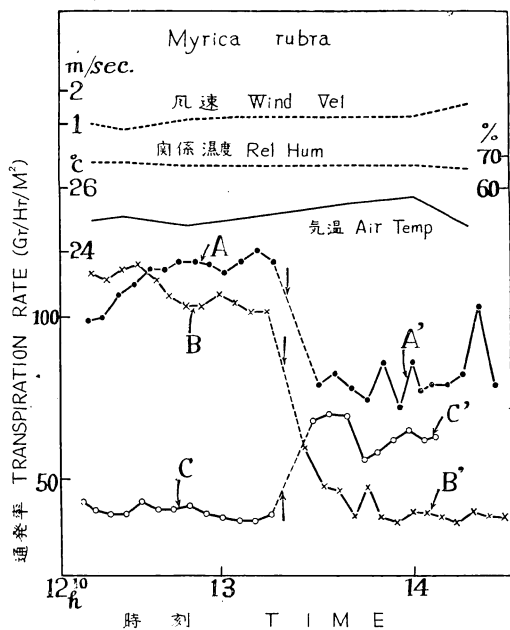


Fig. 2 立木内外における通発率の比較, 1951年10月17日(快晴)測定, 戸外実験, 曲線A, CおよびB'の部分は立木中, 曲線B, A'およびC'の部分は地上における通発率の経過を示す

Transpiration rate in and out of the crown.
Oct. 17, 1951 (fair), field experiment.
Curves A, C and B': in the crown; Curves B, A' and C': out of the crown.

は大差がなく, しかも両曲線はほぼ並行して時間的に変動していることがわかる。そしてその変動は太陽輻射強度ならびに気温と相関関係を有していることがうかがわれ, しかも, それらの周辺因子の変化に対する通発率の変化は10分間前後遅れていることがわかる。

Fig. 2は立木内外における通発率の比較をおこなったもので, 立木内外でもこのように通発率ははなはだしく異なるものである。この実験は1951年10月17日(快晴)に, やはりポトメーターに装置した3本のヤマモモの切枝についておこなったもので, 図中の曲線A, CおよびB'は枝のものと位置にポトメーターを置いた場合の通発率曲線, B, A'およびC'は立木から約2m離れた地上に置いた場合の通発率曲線である。曲線AおよびCはともに立木中における通発率曲線であるにもかかわらず, Aの通発率がCのその2倍以上にもなっているのは, Aが全面的に太陽輻射を受けているのに反してCは日陰にあったからであろう。その証拠として地上で太陽輻射を受けている切枝Bの通発率を見ると, Aのそれとはほぼ等しい値を示している。

つぎに, 図中の矢印の時刻に立木中のものは地上に, 地上のものは立木中のものと位置に置きかえた。その結果, Aの通発率は下降し, Cのそれは上昇して両者の通発率の値はかなり接近してきた。また, 地上より立木中のものと位置(日陰)に移されたB'の通発率の値は曲線C(日陰)のそれと非常によく一致してきた。このように通発率は立木の内外において, また立木中の位置によつてははなはだしく異なる

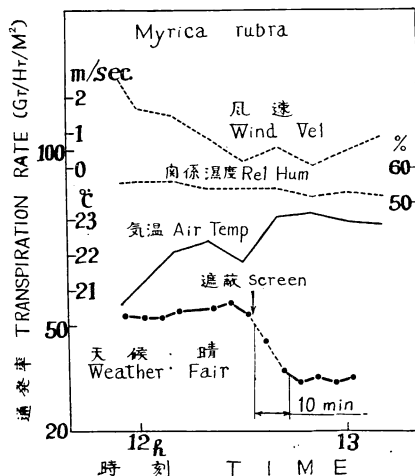


Fig. 3 太陽輻射強度をかえた場合の通発率の変化の遅れを示す, 1951年10月31日(晴)測定, 戸外実験

Lag period of transpiration affected by the variation of solar radiation. Oct. 31, 1951, field experiment.

Fig. 1はポトメーターに装置された2本のヤマモモの切枝について1951年12月4日戸外でおこなった実験結果である。図中の曲線AおよびBの切枝の全葉面積はそれぞれ 1120.6 cm^2 および 870.5 cm^2 であつたが, その通発率の大きさに

が、その原因としては主として太陽輻射の影響が考えられる。なお図中の気温、関係湿度および風速の曲線は終始立木外の日陰で測定した値であるので、この値は通発率の立木内外における差を説明するには役立たない。

さらに Fig. 3 は通発率に及ぼす太陽輻射の影響を調べるために、よく晴れた 1951 年 10 月 31 日にヤマモモの切枝について戸外でおこなった実験結果である。すなわち、全面的に太陽輻射を受けている状態から、突然に図中矢印の時刻 (P. M. 12 時 33 分) にポトメーターの前方約 1 m の所に製図用ケント紙 1 枚を立て、太陽光線を遮蔽してみた結果である。そのために通発率は点線で示したように急下降して、遮蔽前には 53.2 g/hr/m^2 であったものが、約 10 分間後には 35.5 g/hr/m^2 となつて大体安定した。すなわち、このように通発率は太陽輻射強度の変化に応じて大きく変動すると同時に、その変化に要する遅れ時間は約 10 分間であることがわかる。

このように自然条件下における通発率は、複雑な周辺諸因子の変動によつて影響されるものであるから、単にこれらの戸外実験からは個々の周辺因子による影響を分離することは困難である。そこで、筆者は次に説明する小型の Göttingen 型風洞を手製して研究を進めることにしたのである。

3. 実験装置の構造と測定方法

Fig. 4 は手製された Göttingen 型の小型風洞全体の平面図で、A の部分は前面ならびに上面をガラス張りにした測定室である。測定せんとする切枝はポトメーターに装置し、"その 5" において説明したスタンドに取りつけてこの部屋に入れ、観測をおこなうのである。測定室の広さは高さ 63 cm、巾 46 cm、奥行 46 cm である。風洞の風路の長さは 4.7 m で、ファン B を働かせれば、測定室の中央において 0~4 m/sec の風速が得られる。4 隅の E, F, G および H は整流板である。またこの風洞全体は恒温、恒湿に保つ必要があるので、測定室 A 以外は全部二重壁になつている。

Fig. 5 は自動調節装置の電気配線

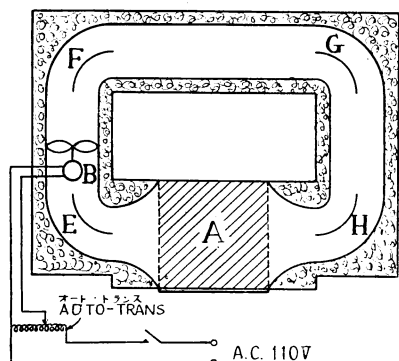


Fig. 4 実験に使用した風洞の平面図
A は測定室, B はベンチレーター, E, F, G および H は整流板

Plan view of the wind tunnel used.
A: Measuring vessel; B: Ventilator;
E, F, G and H: Guide vanes.

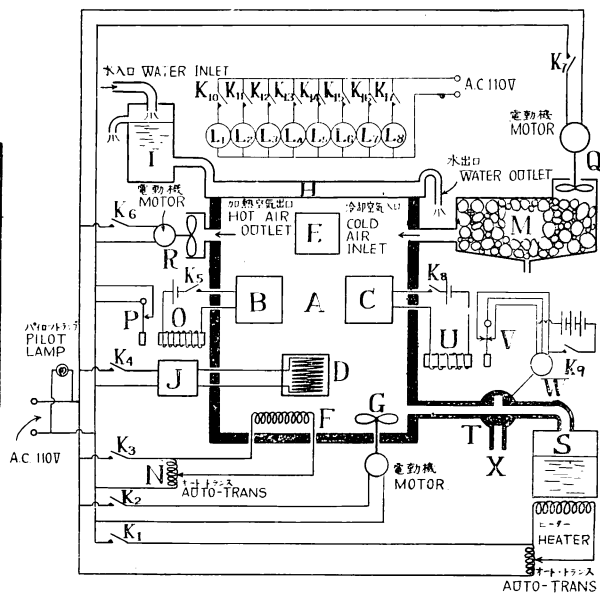


Fig. 5 実験装置の配線ならびに配管図
Showing electric circuit arrangement and pipings of the experimental apparatus used.

ならびに配管を示している。測定室Aには温度ならびに湿度の調節頭BおよびC、塩化カルシウム函E、ヒーターF、輻射計D、攪拌用小風車G、風翼式風速計、湿度計および寒暖計が適当な位置に配置してある。温度および湿度の調節頭BおよびCは、それぞれリレーO、PおよびU、Vを働かせ、電動機R、Qおよび三方コックW、T、Xを働かせて測定室内の温度ならびに湿度を自動的に調節する。Mは氷箱、Sは蒸汽缶である。また、 $L_1 \sim L_8$ は8個の500ワット電球で、Hはそのフィルター、Iは定圧水タンク、Jは輻射強度の自動記録計である。なお、 $K_1 \sim K_{12}$ はそれぞれの電鍵である。

ポトメーターは測定室Aに入れられ、ガラス窓をとうして読み取りをおこない、給水はゴム管で外側からするようになっていいる。

このように輻射強度、気温、湿度ならびに風速を各々単独に変化させることができ、しかも任意の条件下に長時間自動的に保持できる風洞を用いて、通発率と周辺諸因子との関係の一つ一つ調べていったのである。

攪拌用小風車Gは風速を攪乱するので、測定開始後は使用しないようにした。

4. 周辺条件の変化による通発率の遅れ

風洞による実験を開始する前に、周辺条件の変化による通発率の遅れ時間、すなわち、通発率が周辺条件の変化に伴って変化し安定するまでの時間を測定しておく必要がある。そこで筆者は気温、関係湿度および風速をそれぞれ単独に変化せしめた場合の、ヤマモモの通発率の遅れ時間を測定してみた。Figs. 6~8はそれらの結果を示す。

Figs. 6~8はいずれも点灯した実験室内で、それぞれ気温、関係湿度および風速を変化した場合の通発率の遅れ時間を示す。これらの場合には輻射強度をかえた場合と異なり、周辺因子を変化するためにどうしても若干の時間を必要とする。したがって、それだけ遅れ時間はのびることになる。それにもかかわ

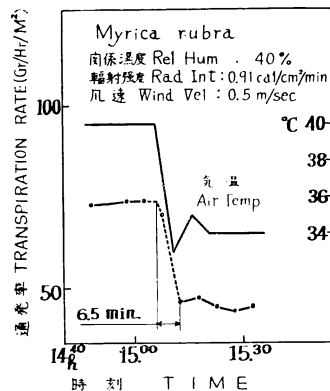


Fig. 6 気温をかえた場合の通発率の変化の遅れを示す
 1953年2月19日測定、室内実験

Lag period of transpiration affected by the variation of air temperature. Feb. 19, 1953, laboratory experiment.

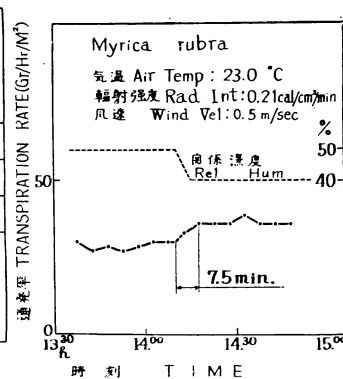


Fig. 7 関係湿度をかえた場合の通発率の変化の遅れを示す
 1953年3月2日測定、室内実験

Lag period of transpiration affected by the variation of relative humidity. Mar. 2, 1953, laboratory experiment.

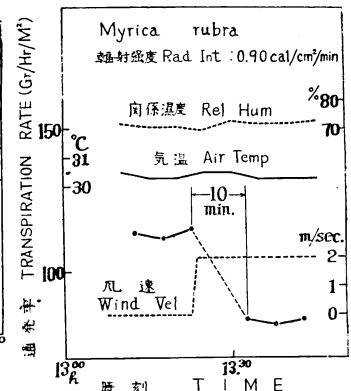


Fig. 8 風速をかえた場合の通発率の変化の遅れを示す
 1953年7月31日測定、室内実験

Lag period of transpiration affected by the variation of wind velocity. July 31, 1953, laboratory experiment.

らず、遅れ時間はそれぞれの図中に示したように、およそ 6.5, 7.5, 10 分間と観測された。

このように周辺因子をそれぞれ単独に変化させた場合の通発率の遅れ時間は最大 10 分間であつた。

5. 通発率と気温ならびに湿度との関係

通発率と気温との関係については、前に述べたように MEYER²¹⁾ は直線関係を与えているが、筆者がおこなつた実験結果では直線関係にはならなかつた。

Figs. 9 および 10 はヤマモモおよびスギについてそれぞれ 1953 年 2 月 11 日から同年 3 月 9 日までの間、および 1954 年 2 月 25 日から同年 3 月 3 日までの間に、前者では風速 0.5 m/sec、後者では 2 m/sec のもとに、輻射強度ならびに湿度を一定に保ち気温のみを変化せしめておこなつた実験結果である。Fig. 9 は合計 15 回おこなつた実験のうちの 5 回、Fig. 10 は 4 回の実験全部の結果を示している。これらの結果からわかるように、ヤマモモおよびスギの場合には、ともに通発率は気温の上昇とともに加率的に増大し、関係湿度の減少とともに曲線全体が上昇する傾向を有している。しかもこれらの曲線にはおおむね 2 個所に彎曲点が見られ、それらの位置は大体気温によつて定まつているようである。Fig. 9 の関係湿度 70% と 80% の曲線の位置の逆転は例外で、これは次に述べる通発率と湿度との関係を見るとわかるように、80% の曲線が 70% の曲線の下側にくるのが正常である。

つぎに通発率と関係湿度との関係であるが、これについてはやはりヤマモモおよびスギについてそれぞれ 1953 年 2 月 24 日から同年 4 月 8 日までの間、および 1954 年 3 月 5 日から同年 3 月 20 日までの間に、前者では風速 0.5 m/sec、後者では 2 m/sec のもとに、輻射強度ならびに気温を一定に保ち関係湿度のみを変化せしめてそれぞれ 22 回および 5 回の実験をおこなつた。そのうちヤマモモについては 7 回の暗室実験および輻射強度 0.21 cal/cm²/min のもとにおける 7 回の実験結果のみをそれぞれ Figs. 11 お

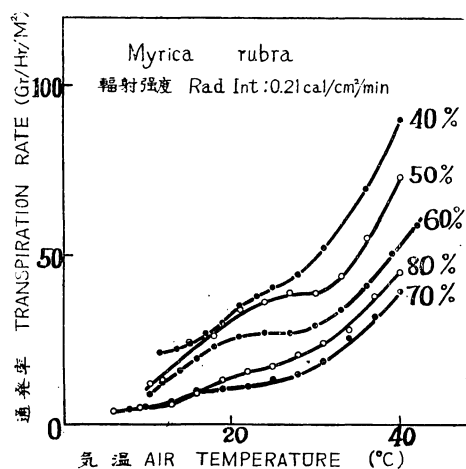


Fig. 9 通発率と気温との関係、1953 年 2 月 11 日～3 月 9 日測定、室内実験、風速は 0.5 m/sec

Relation between transpiration rate and air temperature. Feb. 11 to Mar. 9, 1953, laboratory experiment. Wind velocity, 0.5 m/sec.

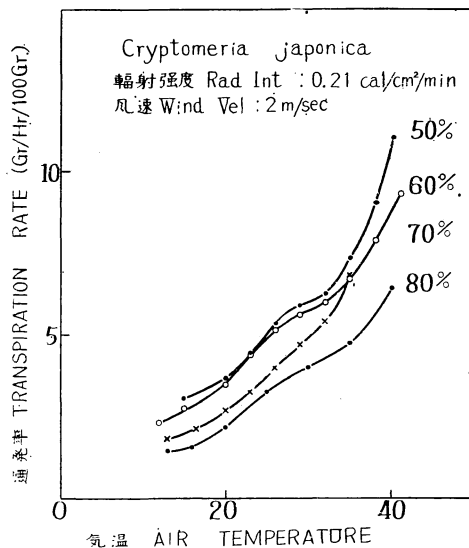


Fig. 10 通発率と気温との関係、1954 年 2 月 25 日～3 月 3 日測定、室内実験

Relation between transpiration rate and air temperature. Feb. 25 to Mar. 3, 1954, laboratory experiment.

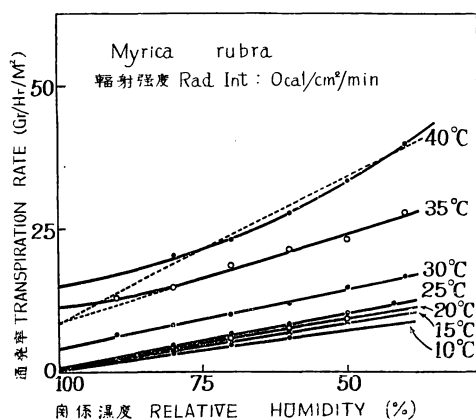


Fig. 11 通発率と関係湿度との関係, 1953年2月24日～4月8日測定, 室内実験, 風速は 0.5 m/sec

Relation between transpiration rate and relative humidity. Feb. 24 to Apr. 8, 1953, laboratory experiment. Wind velocity, 0.5 m/sec.

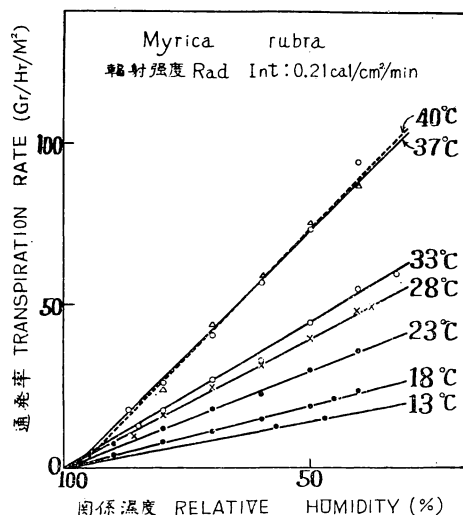


Fig. 12 通発率と関係湿度との関係, 1953年2月24日～4月8日測定, 室内実験, 風速は 0.5 m/sec

Relation between transpiration rate and relative humidity. Feb. 24 to Apr. 8, 1953, laboratory experiment. Wind velocity, 0.5 m/sec.

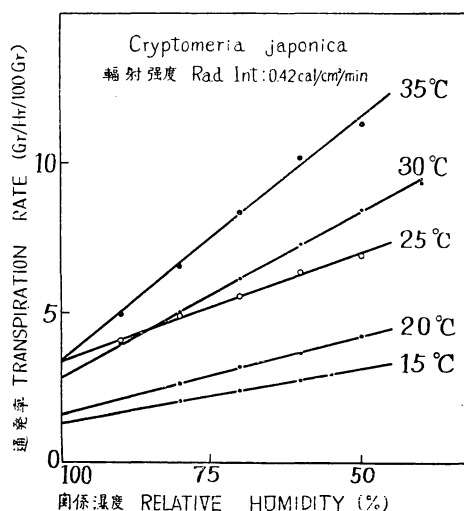


Fig. 13 通発率と関係湿度との関係, 1954年3月5日～3月20日測定, 室内実験, 風速は 2 m/sec

Relation between transpiration rate and relative humidity. Mar. 5 to Mar. 20, 1954, laboratory experiment. Wind velocity, 2 m/sec.

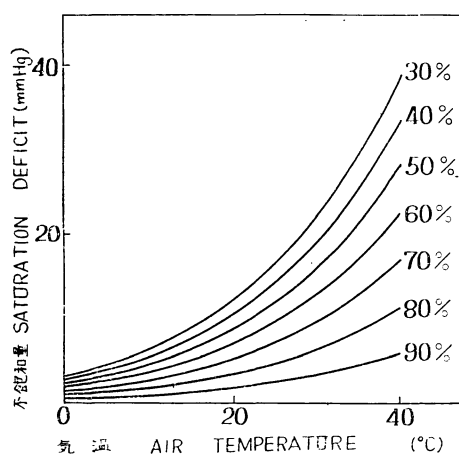


Fig. 14 大気中の水蒸気の飽和不足量と気温との関係 (FOWLE の物理常数表より)

Relation between saturation deficit of atmosphere and air temperature. (From FOWLE's Smithsonian Physical Tables)

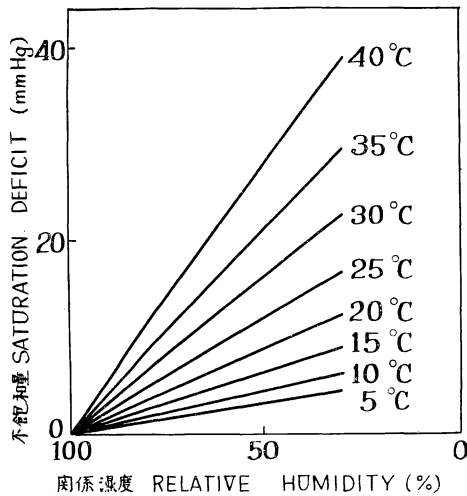


Fig. 15 大気中の水蒸気の飽和不足量と関係湿度との関係 (FOWLE の物理常数表より)
Relation between saturation deficit of atmosphere and relative humidity. (From FOWLE'S Smithsonian Physical Tables)

よび 12 に示した。また、スギについてはその全部の結果を Fig. 13 に示しておいた。これらの結果を見るといずれも通発率は関係湿度と直線の関係にあることがわかる。そして、それらの直線の傾斜は気温の上昇とともに加速的に増加する傾向を有し、輻射強度の増加によつてもまた増大することがわかる。

このように通発率の気温ならびに湿度に対する関係は複雑であるが、これらの性質とよく似た性質を有するものが1つある。それは大気中の水蒸気の飽和不足量である。Figs. 14 および 15 はそれを示すために FOWLE の物理常数表¹²⁾ から計算した飽和不足量と気温ならびに湿度との関係を示した理論曲線である。このように両者の傾向はよく似ていることがわかる。ただ異なる点は、通発率と温度との関係を表わす曲線に 2 つの彎曲点があることである。

そこで Figs. 9 および 10 の各曲線を、飽和不足量に比例する部分と、その残部とにわけて、別々

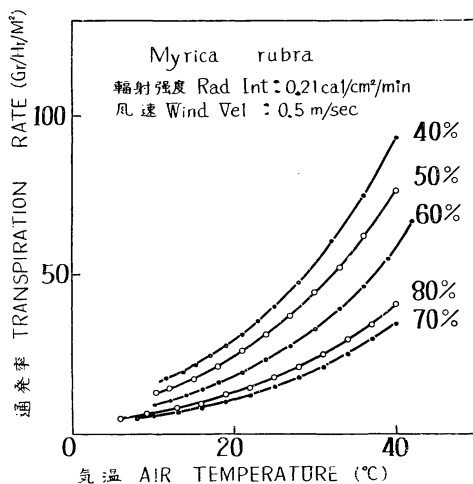


Fig. 16 Fig. 9 に示した通発率曲線の値のうち飽和不足量に比例する成分

Main components of the curves of transpiration rate in figure 9 those are directly proportional to saturation deficit of atmosphere.

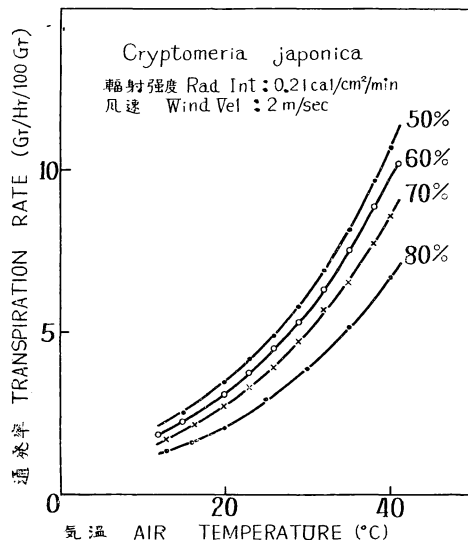


Fig. 17 Fig. 10 に示した通発率曲線の値のうち飽和不足量に比例する成分

Main components of the curves of transpiration rate in figure 10 those are directly proportional to saturation deficit of atmosphere.

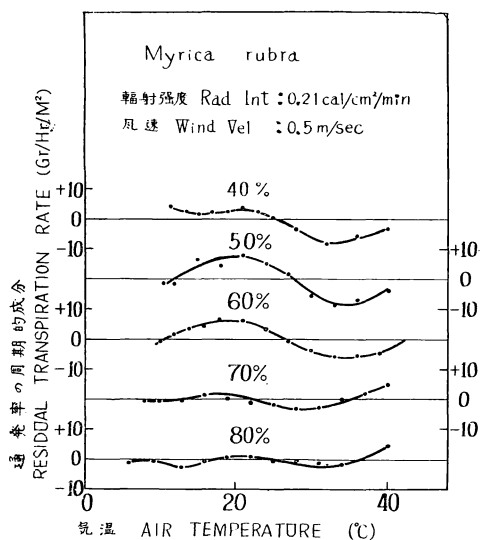


Fig. 18 Fig. 9 に示した通発率曲線の値のうちの周期的成分

Periodical components of the curves of transpiration rate in figure 9.

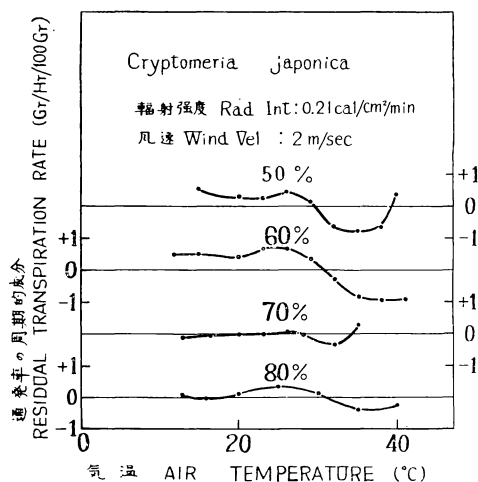


Fig. 19 Fig. 10 に示した通発率曲線の値のうちの周期的成分

Periodical components of the curves of transpiration rate in figure 10.

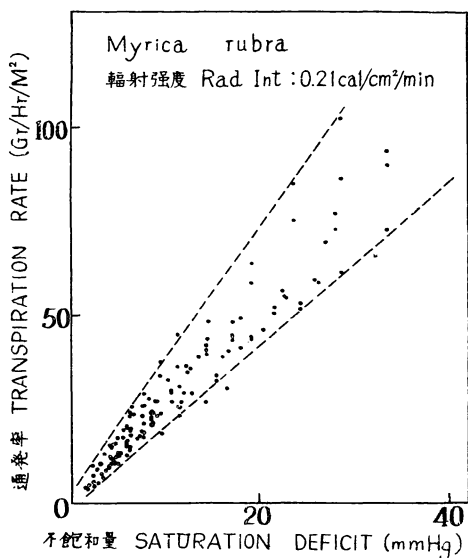


Fig. 20 通発率と飽和不足量との関係、風速は 0.5 m/sec

Relation between transpiration rate and saturation deficit of atmosphere. Wind velocity, 0.5 m/sec.

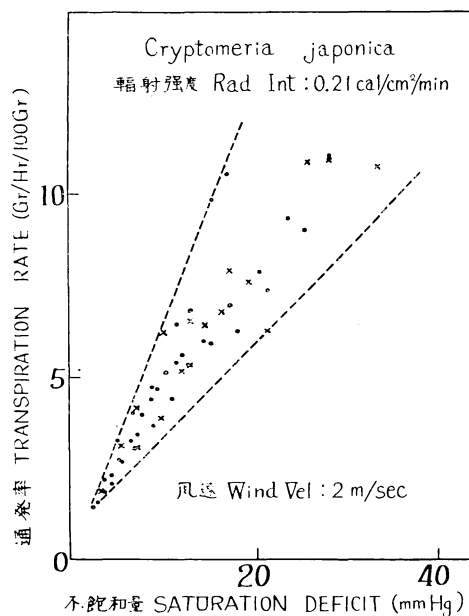


Fig. 21 通発率と飽和不足量との関係、・印と×印とは光波長の混合割合が異なる
Relation between transpiration rate and saturation deficit of atmosphere. Marks • and × show the transpiration rates under different combinations of wave lengths of light.

に図示すると、それぞれ Figs. 16 および 17, Figs. 18 および 19 のようになる。

Figs. 16 および 17 は飽和不足量に比例する部分で、これが主成分をなし、Figs. 18 および 19 はその残部で、これは図のように温度を変数とした一種の周期函数とみなしてよい。したがって、この残部は飽和不足量とは無関係な成分であつて、なにか気孔の開閉運動のような植物体の調節作用に関連を有する成分ではなからうかと推察される。しかしこれについてはいまのところ明らかでない。

以上述べたことから、一定輻射強度ならびに一定風速のもとでは、通発率は従来多くの研究者によつて報告されているように、大気中の水蒸気の飽和不足量にほぼ比例することが推測されるのである。そこで過去において、ヤマモモおよびスギについておこなつたそれぞれ 67 回および 26 回の実験結果を整理してヤマモモでは 13 段階、スギでは 9 段階に輻射強度をわけ、通発率と飽和不足量との関係を求めてみると、推測どおりほぼ正比例的関係が得られた。それらのうちそれぞれ一例だけを Figs. 20 および 21 に示しておいた。Fig. 21 中の×印は 500 ワット電球 1 個を点灯した場合の通発率の値で、・印は 500 ワット電球 8 個を点灯して水フィルターにより熱線を吸収せしめた場合の通発率の値である。しかし、両者の輻射強度はともに $0.21 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$ であることはもちろんである。すなわち、前者の場合では輻射は長波長に富み、後者の場合では短波長に富むことになる。それにもかかわらず両者の通発率に大差がないことから、波長の差が通発率に及ぼす影響はこの樹種では重大でないことがうかがわれる。

Figs. 20 および 21 の中に通発率と温度との関係のような周期性が現われていないのは、暗に Figs. 9 および 10 の周期性は気温のみに関係し、湿度には無関係であることを示している。しかし、図中の点がかかなり散布された一つの原因としては、通発率の温度に対する周期的成分の影響が考えられるのである。

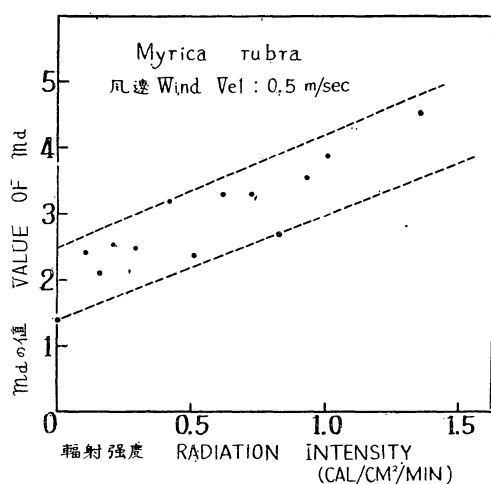


Fig. 22 通発率を $T = m_d H_d + n_d$ で表わした場合の m_d の値と輻射強度との関係

Relation between radiation intensity and value of m_d in equation $T = m_d H_d + n_d$, where T represents the transpiration rate and H_d the saturation deficit of atmosphere.

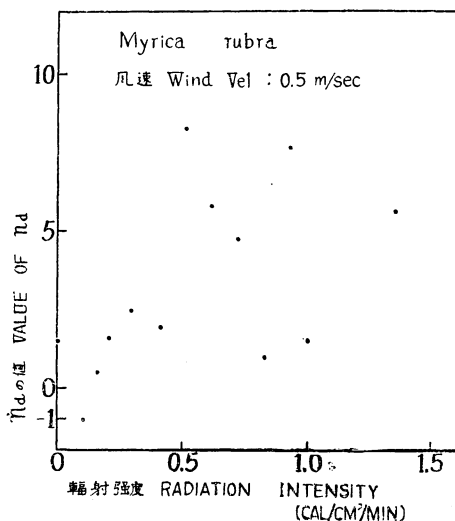


Fig. 23 通発率を $T = m_d H_d + n_d$ で表わした場合の n_d の値と輻射強度との関係

Relation between radiation intensity and value of n_d in equation $T = m_d H_d + n_d$, where T represents the transpiration rate and H_d the saturation deficit of atmosphere.

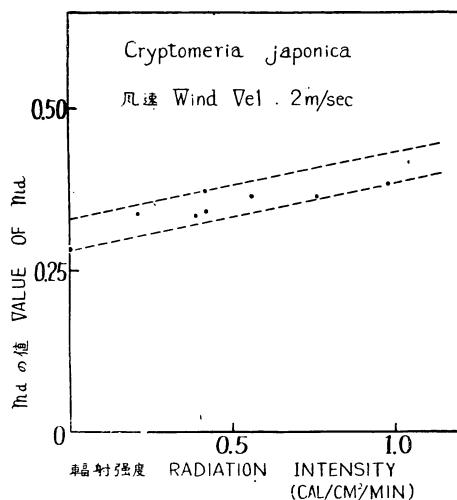


Fig. 24 通発率を $T = m_d H_d + n_d$ で表わした場合の m_d の値と輻射強度との関係

Relation between radiation intensity and value of m_d in equation $T = m_d H_d + n_d$, where T represents the transpiration rate and H_d the saturation deficit of atmosphere.

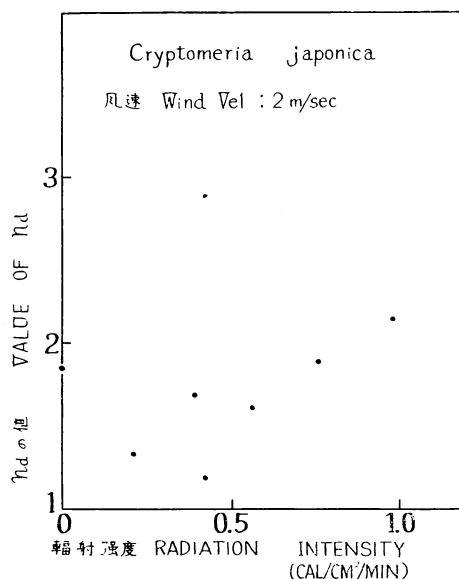


Fig. 25 通発率を $T = m_d H_d + n_d$ で表わした場合の n_d の値と輻射強度との関係

Relation between radiation intensity and value of n_d in equation $T = m_d H_d + n_d$, where T represents the transpiration rate and H_d the saturation deficit of atmosphere.

そこで、通発率 T と飽和不足量 H_d との関係を直線と考えて、 $T = m_d H_d + n_d$ 、とおき、その傾斜 m_d および縦軸との交点 n_d の値を最小自乗法によつて求め、それらの値と輻射強度との関係を調べてみると、ヤマモモでは Figs. 22 および 23、スギでは Figs. 24 および 25 に示したような結果になった。いずれの樹種の場合にも Figs. 22 および 24 のように、 m_d と輻射強度との関係は密接であるが、 n_d と輻射強度との関係は Figs. 23 および 25 のように密接でない。したがつて、この結果から m_d および n_d の値を求めて通発率 T の計算式を誘導することはできるが、 n_d のために大きな誤差がはいるおそれがあるので中止し、さらに他の関係を探してみることにした。

6. 通発率と輻射強度との関係

通発率と気温ならびに湿度との関係から通発率 T の計算式を誘導することが不利であつたので、つぎに通発率と輻射強度との関係を調べてみることにした。しかし、この関係を実験室内で測定するにあつては、まず暗室内における読み取り用照明灯の影響、ならびに波長の差による影響を吟味しておく必要がある。そこでヤマモモおよびスギについて次のような実験をおこなつてこの問題を吟味した。

Figs. 26 および 27 は、暗室内における読み取り用照明灯の影響を調べるために、それぞれ 1951 年 12 月 4 日および 1954 年 6 月 30 日にヤマモモおよびスギの切枝についておこなつた実験結果である。切枝は戸外でポトメーターに装置し、直ちに暗室に運んだ。そしてその通発率が一定になるのを待つて、図中それぞれ矢印の時刻に約 1 m 上方に 100 ワット電球 1 個を点灯してその影響を調べた。Fig. 26 で

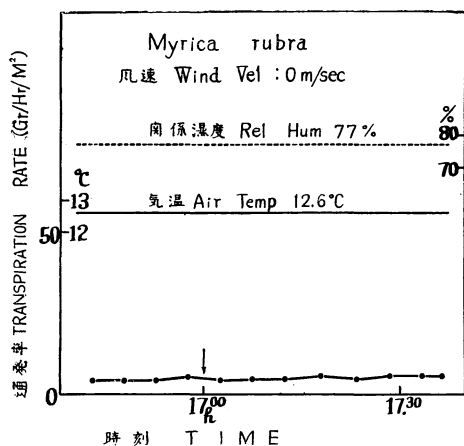


Fig. 26 暗室内での読み取り用照明灯の影響の吟味, 1951 年 12 月 4 日測定, 室内実験, 矢印は 100 w 電球の点灯時刻を示す

Examination of influence due to the illuminating lamp necessary to light in order to take readings. Dec. 4, 1951, laboratory experiment. Small arrow head in the figure shows an instant of lighting 100 w electric lamp.

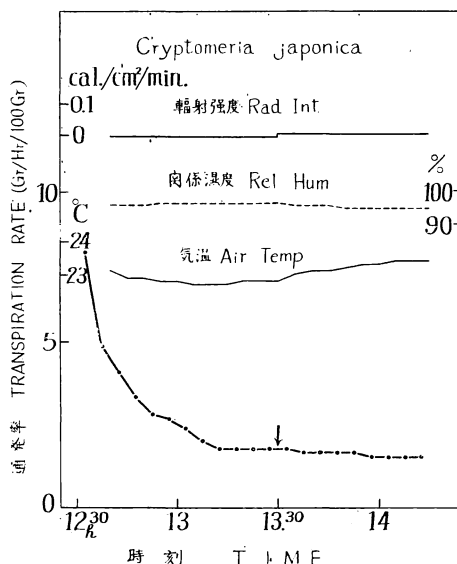


Fig. 27 暗室内での読み取り用照明灯の影響の吟味, 1954 年 6 月 30 日測定, 室内実験, 矢印は 100 w 電球の点灯時刻を示す

Examination of influence due to the illuminating lamp necessary to light in order to take readings. June 30, 1954, laboratory experiment. Small arrow head in the figure shows an instant of lighting 100 w electric lamp.

は通発率が安定してから後の通発率曲線のみを示し, Fig. 27 では枝切断 10 分後の通発率曲

線を示してある。100 ワット電球点灯前の読み取りにはマツチまたは豆電球を使用した。両図からわかるように 100 ワット電球 1 個を点灯したための影響らしいものはほとんど認められない。すなわち, 読み取りのための照明程度では通発率はほとんど影響されないと考えてさしつかえないことになる。そこで暗室内での読み取りには 40 ワットの電球 1 個を使用し, 必要に応じてこれを点滅して測定をおこなうことにした。

つぎに光波長の差による影響を吟味するために, 500 ワット電球 8 個のほかに 250 ワット 高圧水銀灯 1 個を用い, 同一電灯輻射強度のもとにこの水銀灯を点滅してその影響を調べてみた。実験は風洞内でヤマモモおよびスギの切枝について合計 4 回おこなった。そのうち気温 30°C, 関係湿度 80% および風速 1 m/sec のもとでおこなったそれぞれ 1 回ずつの実験結果を Figs. 28 および 29 に示した。

図中の “IN” および “OFF” は一定の電灯輻射強度のもとで高圧水銀灯を点滅した時刻を示している。ヤマモモの場合 (Fig. 28) ではいくらか水銀灯の影響があるようであるが, IVANOV und THIEL-MANN¹³⁾ が報告しているほどの著しい影響は認められない。この場合, もちろん水銀灯を点灯したために輻射強度も図示されたようにいくらか増大するから, その影響は考えられる。また, スギの場合 (Fig. 29) ではほとんどその影響が認められなかつた。またこの樹種については光波長の差による影響が僅少であることは, 前項の Fig. 21 にも示しておいた。このようにこれらの樹種においては, 光波長の差による通発率の変化が僅少であるので, 筆者は次に電灯輻射のもとにおいて, 両樹種の通発率と輻射強度との関係を風洞内で求めていったのである。

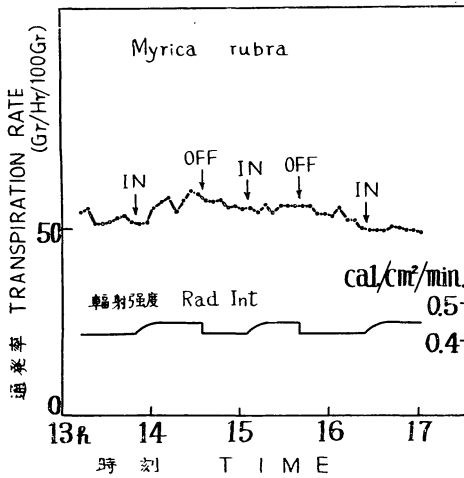


Fig. 28 光波長の差による影響の吟味, 1954年6月2日測定, 室内実験, INおよびOFFは250 w 高圧水銀灯の点滅時刻を示す
Examination of influence due to the difference of wave lengths of light. June 2, 1954, laboratory experiment. IN and OFF show the instants of switching in and off the 250 w high pressure mercury vapour lamp.

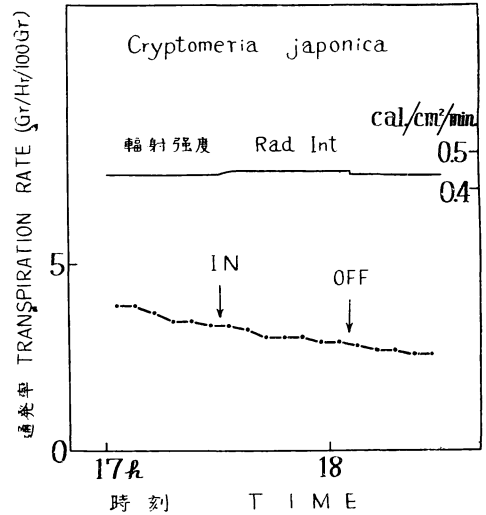


Fig. 29 光波長の差による影響の吟味, 1954年7月1日測定, 室内実験, INおよびOFFは250 w 高圧水銀灯の点滅時刻を示す
Examination of influence due to the difference of wave lengths of light. July 1, 1954, laboratory experiment. IN and OFF show the instants of switching in and off the 250 w high pressure mercury vapour lamp.

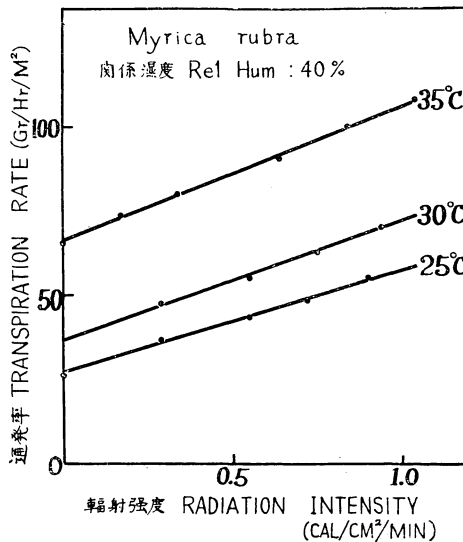


Fig. 30 通発率と輻射強度との関係, 1953年3月10日~4月10日測定, 室内実験, 風速は0.5 m/sec
Relation between transpiration rate and radiation intensity. Mar. 10 to Apr. 10, 1953, laboratory experiment. Wind velocity, 0.5 m/sec.

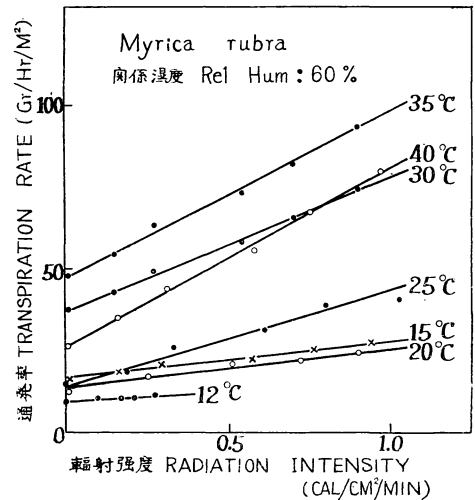


Fig. 31 通発率と輻射強度との関係, 1953年3月10日~4月10日測定, 室内実験, 風速は0.5 m/sec
Relation between transpiration rate and radiation intensity. Mar. 10 to Apr. 10, 1953, laboratory experiment. Wind velocity, 0.5 m/sec.

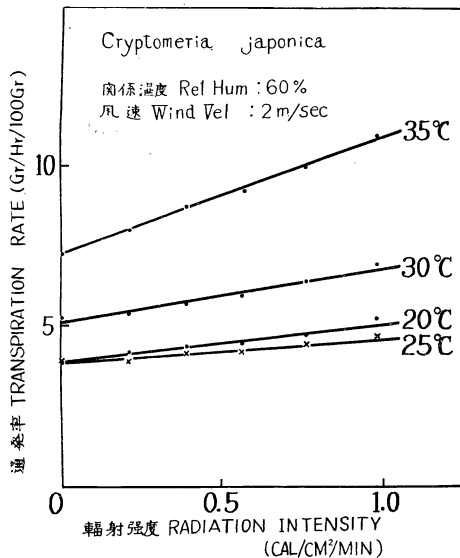


Fig. 32 通発率と輻射強度との関係, 1954年2月24日～4月16日測定, 室内実験
Relation between transpiration rate and radiation intensity. Feb. 24 to Apr. 16, 1954, laboratory experiment.

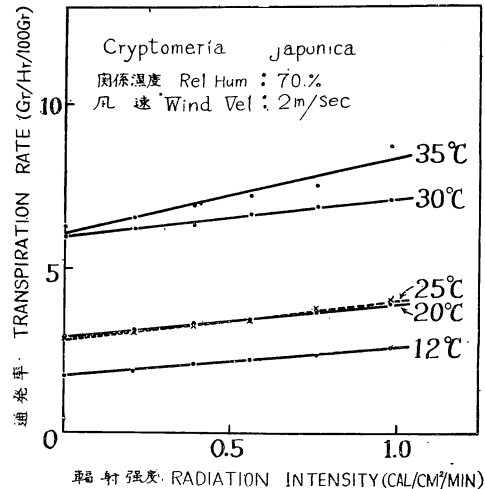


Fig. 33 通発率と輻射強度との関係, 1954年2月24日～4月16日測定, 室内実験
Relation between transpiration rate and radiation intensity. Feb. 24 to Apr. 16, 1954, laboratory experiment.

ヤマモモについては1953年3月10日より同年4月10日までの間に27回, スギについては1954年2月24日より同年4月16日までの間に19回の実験をおこなったが, 前者についてはそのうちの10回, 後者については9回の実験結果のみをそれぞれ Figs. 30 および 31, Figs. 32 および 33 に示しておいた。風速は前者では終始 0.5 m/sec, 後者では終始 2 m/sec に保たれた。また, 輻射強度をかえるためには8個の500ワット電球を適宜点滅しておこなった。図から明らかなように, これらの関係はほとんど例外なく直線で最もよく表わされることがわかった。そこで通発率をTとし, 輻射強度をRとすると,

$$T = m_r R + n_r \dots \dots \dots (1)$$

なる式でこの関係を表わすことができる。ここで m_r はこの直線の傾斜を表わし, これは輻射強度が通発率に及ぼす影響の大小を示す値である。また, n_r はこの直線と縦軸との交点の値, いいかえれば, 輻射強度が零の時の通発率の値を示している。これらの係数 m_r および n_r の値は Figs. 30～33 を見ると, いずれも気温が高くなるにしたがって大になり, 関係湿度が高くなるにしたがって小になる傾向がある。すなわち, m_r および n_r はともに気温ならびに関係湿度の函数であることがわかる。

そこでヤマモモおよびスギについておこなったそれぞれ27回および19回の実験の結果から, 最小自乗法によつて m_r および n_r の値をいちいち計算して, その値と最も強い相関関係をもつような因子を探してみた。すると Figs. 34～37 に示したように, これらの値はともに大気中の水蒸気の飽和不足量と最も強い相関関係にあることがわかった。

Figs. 34 および 35 はヤマモモについての m_r および n_r の値と大気中の水蒸気の飽和不足量との関係で, Figs. 36 および 37 はスギについての m_r および n_r の値と大気中の水蒸気の飽和不足量との関係

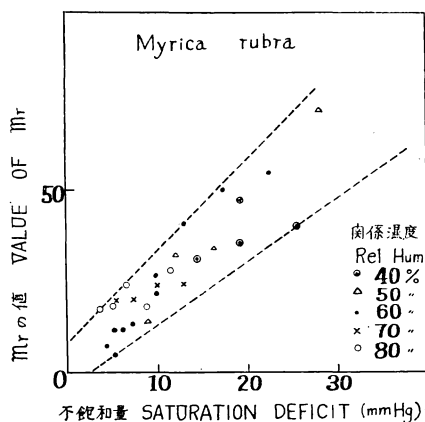


Fig. 34 通発率を $T = m_r R + n_r$ で表わした場合の m_r の値と飽和不足量との関係、風速は 0.5 m/sec

Relation between saturation deficit of atmosphere and value of m_r in equation $T = m_r R + n_r$, where T represents the transpiration rate and R the radiation intensity. Wind velocity, 0.5 m/sec .

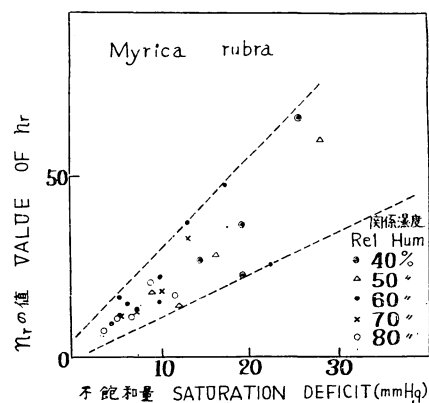


Fig. 35 通発率を $T = m_r R + n_r$ で表わした場合の n_r の値と飽和不足量との関係、風速は 0.5 m/sec

Relation between saturation deficit of atmosphere and value of n_r in equation $T = m_r R + n_r$, where T represents the transpiration rate and R the radiation intensity. Wind velocity, 0.5 m/sec .

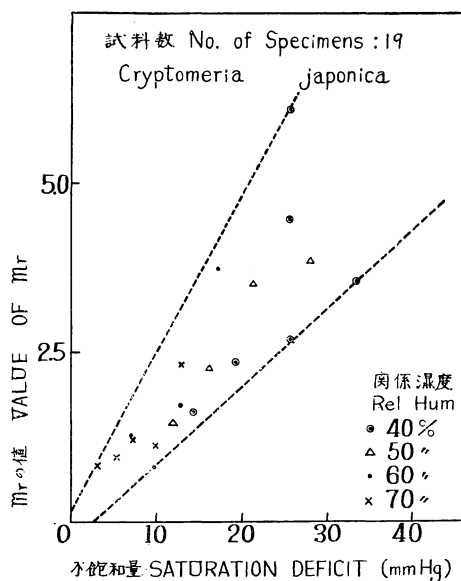


Fig. 36 通発率を $T = m_r R + n_r$ で表わした場合の m_r の値と飽和不足量との関係、風速は 2 m/sec

Relation between saturation deficit of atmosphere and value of m_r in equation $T = m_r R + n_r$, where T represents the transpiration rate and R the radiation intensity. Wind velocity, 2 m/sec .

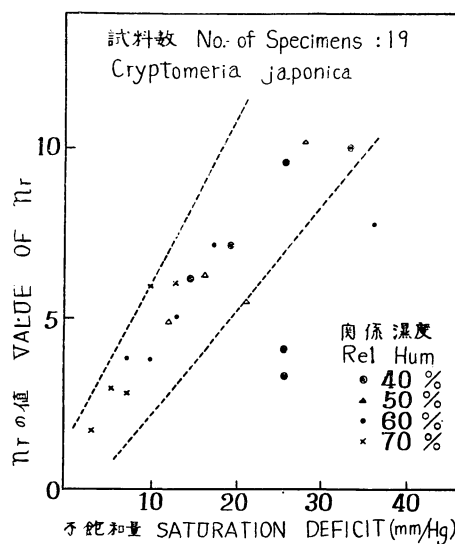


Fig. 37 通発率を $T = m_r R + n_r$ で表わした場合の n_r の値と飽和不足量との関係、風速は 2 m/sec

Relation between saturation deficit of atmosphere and value of n_r in equation $T = m_r R + n_r$, where T represents the transpiration rate and R the radiation intensity. Wind velocity, 2 m/sec .

係である。図のようにこれらの値は点線で示した範囲内に散らばつてはいるが、いずれの場合にも直線関係にあると考えて差し支えない。また、図中の点の散らばりは、異なつた記号を用いて示したように、関係湿度とは無関係であつた。

そこで、これら m_r および n_r の値と飽和不足量 H_d との間の関係を直線と考えて、ふたたび最小自乗法により、その傾斜の値と縦軸との交点の値とを計算し、それぞれの樹種に対する m_r および n_r の実験式を求めると次のような結果が得られる。ただし、スギの n_r と H_d との関係のうち、Fig. 37 のように点線の範囲からひどく離れた 2 点の値は採用しなかつた。また、 n_r は輻射強度が零の場合の通発率の値を示し、大気飽和不足量 H_d が零の時には当然零であると考えられるから、 n_r と H_d との関係を表わす直線は原点を通過するものとして計算した。

ヤマモモの場合 (風速=0.5 m/sec) :

$$\left. \begin{aligned} m_r &= 2.13 H_d + 2.65 \\ n_r &= 1.99 H_d \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

m_r の平均誤差=5.51 n_r の平均誤差=5.13

スギの場合 (風速=2 m/sec) :

$$\left. \begin{aligned} m_r &= 0.14 H_d + 0.15 \\ n_r &= 0.36 H_d \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

m_r の平均誤差=0.57 n_r の平均誤差=0.88

そこで、これら (2) および (3) 式を (1) 式に代入すれば、それぞれの樹種に対する通発率 T の計算式が得られる。すなわち、

ヤマモモの場合 (風速=0.5 m/sec) :

$$T = (2.13 R + 1.99) H_d + 2.65 R \dots\dots\dots (4)$$

T の平均誤差=5.60

スギの場合 (風速=2 m/sec) :

$$T = (0.14 R + 0.36) H_d + 0.15 R \dots\dots\dots (5)$$

T の平均誤差=0.97

ここで R は $\text{cal/cm}^2/\text{min}$ 単位で表わした輻射強度、 H_d は mmHg 単位で表わした大気中の水蒸気の飽和不足量である。

また飽和不足量 H_d は、大気中の飽和水蒸気圧を $e_s (\text{mmHg})$ 、その時の関係湿度を $H_r \times 100 (\%)$ で表わせば、

$$H_d = e_s (1 - H_r) \dots\dots\dots (6)$$

で表わされる量である。

7. 通発率と風速との関係

以上で一定風速下における通発率の計算式が得られたので、つぎに風速をかえた場合の通発率の変化を求める必要がある。そのためにヤマモモおよびスギについて、それぞれ 1954 年 1 月 19 日から同年 3 月 17 日までの間、および 1954 年 2 月 1 日から同年 3 月 31 日までの間に、27 回および 26 回の実験をおこなつた。そのうち、両樹種とも 4 回ずつの実験結果のみを Figs. 38 および 39 に示した。

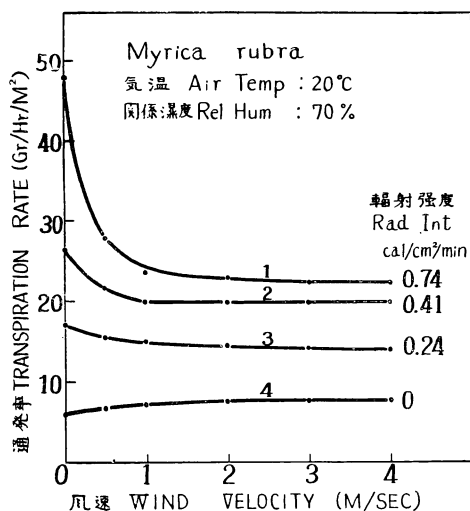


Fig. 38 通発率と風速との関係, 1954 年 1 月 19 日～3 月 17 日測定, 室内実験

Relation between transpiration rate and wind velocity. Jan. 19 to Mar. 17, 1954, laboratory experiment.

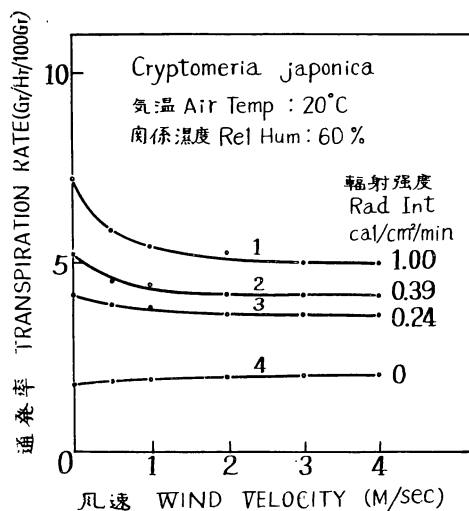


Fig. 39 通発率と風速との関係, 1954 年 2 月 1 日～3 月 31 日測定, 室内実験

Relation between transpiration rate and wind velocity. Feb. 1 to Mar. 31, 1954, laboratory experiment.

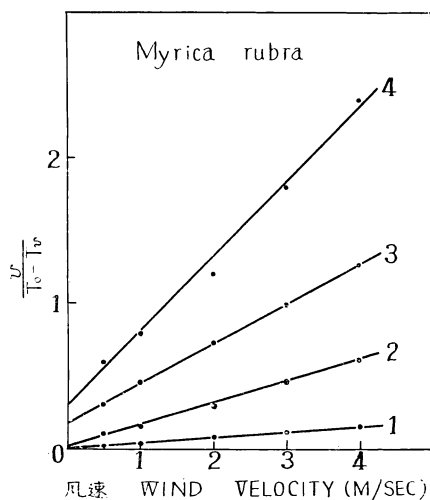


Fig. 40 Fig. 38 の関係は, 風速と $(T_0 - T_r)$ との比をとれば風速と直線関係になることを示す, 図中の番号は, Fig. 38 のそれに対応する

Showing the relations in figure 38 can be converted into linear relations if the ratios of wind velocity to $(T_0 - T_r)$ were plotted against the wind velocity. Curve numbers in the figure correspond to that of figure 38.

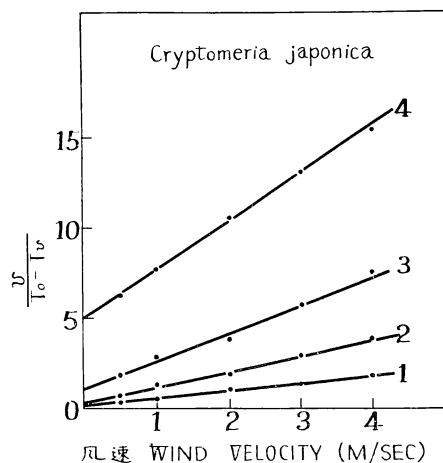


Fig. 41 Fig. 39 の関係は, 風速と $(T_0 - T_r)$ との比をとれば風速と直線関係になることを示す. 図中の番号は, Fig. 39 のそれに対応する

Showing the relations in figure 39 can be converted into linear relations if the ratios of wind velocity to $(T_0 - T_r)$ were plotted against the wind velocity. Curve numbers in the figure correspond to that of figure 39.

これらの結果を見ると、通発率は $0 \sim 1 \text{ m/sec}$ の低風速の範囲内では風速が増加するにつれて急速に下降し、 $1 \sim 4 \text{ m/sec}$ の範囲内ではほぼ一定の値に漸近する傾向があることがわかる。またその下降の割合は、輻射強度が小になるにしたがつて減少し、 $0 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$ のもとでは逆に上昇する傾向が見られる。

つぎにこれらの曲線の実験式を求めるために、風速を v で表わし、風速が零の時の通発率を T_0 、任意の風速 v の時の通発率を T_v で表わして、 $v/(T_0 - T_v)$ を計算し、その値と風速との関係を求めると、Figs. 40 および 41 のように直線関係が得られる。Fig. 40 の各直線は Fig. 33 の同一番号の各曲線に対応し、Fig. 41 の各直線は Fig. 39 の同一番号の各曲線に対応している。今 a をこの直線の傾斜の値、 b を縦軸との交点の値とすれば、これらの直線は次式によつて表わされることになる。

$$v/(T_0 - T_v) = av + b \quad \dots\dots\dots (7)$$

図から明らかなように、これらの係数 a および b の値はともに輻射強度の増加とともに減少する。そこで最小自乗法により、両樹種についておこなつたそれぞれ 27 回および 26 回の実験結果からいちいち a および b の値を求め、それらの値と輻射強度との関係を調べて見ると、Figs. 42~45 のような結果が得られた。すなわち、 a または b の対数値は輻射強度が増加するにしたがつてほぼ直線的に減少する傾向を示している。そこで、重ねて最小自乗法を用いて、これらの傾斜の値および縦軸との交点の値とを求めて (7) 式に代入すれば、それぞれの樹種に対する通発率 T_v と風速 v との関係式が得られる。その結果の式のみを次に挙げる。

ヤマモモの場合：

$$\left. \begin{aligned} T_v &= T_0 + v / (0.55 e^{-3.15 R} \cdot v + 0.32 e^{-5.41 R}) \\ &= T_0 + v / (0.55 \times 10^{-1.37 R} \cdot v + 0.32 \times 10^{-2.35 R}) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

スギの場合：

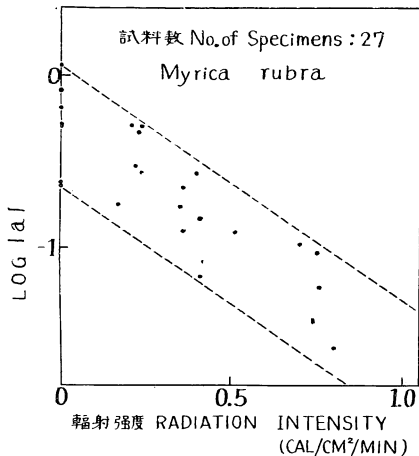


Fig. 42 Fig. 40 に示された直線の傾斜値 a の対数値と輻射強度との関係

Relation between logarithmic values of gradient "a"s of straight lines in figure 40 and the others and radiation intensity.

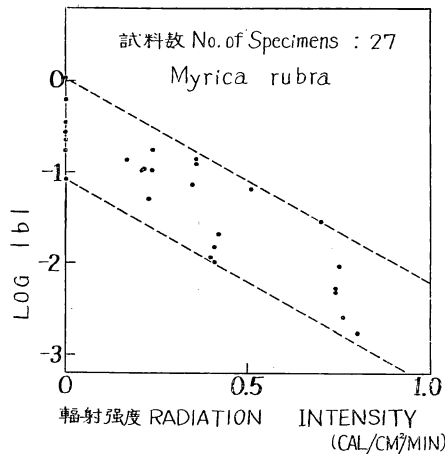


Fig. 43 Fig. 40 に示された直線と縦軸との交点の値 b の対数値と輻射強度との関係

Relation between logarithmic values of Y-intercept "b"s of straight lines in figure 40 and the others and radiation intensity.

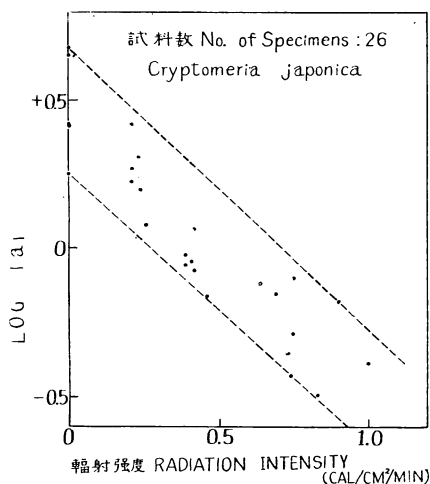


Fig. 44 Fig. 41 に示された直線の傾斜値 a の対数値と輻射強度との関係

Relation between logarithmic values of gradient " a "s of straight lines in figure 41 and the others and radiation intensity.

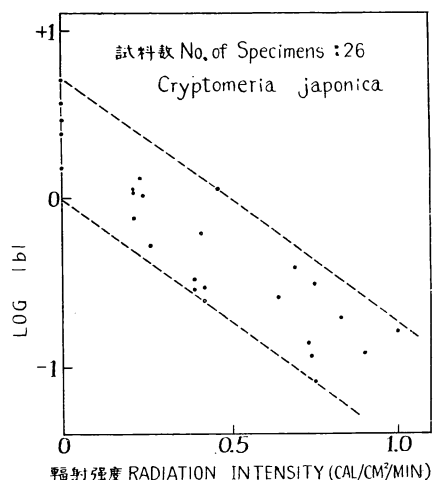


Fig. 45 Fig. 41 に示された直線と縦軸との交点の値 b の対数値と輻射強度との関係

Relation between logarithmic values of Y-intercept " b "s of straight lines in figure 41 and the others and radiation intensity.

$$\left. \begin{aligned} T_v &= T_0 + v / (2.77 e^{-2.20R} \cdot v + 2.16 e^{-3.33R}) \\ &= T_0 + v / (2.77 \times 10^{-0.96R} \cdot v + 2.16 \times 10^{-1.45R}) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (9)$$

ここで v は m/sec 単位で表わした風速, R は $cal/cm^2/min$ 単位で表わした輻射強度, e は自然対数の底, T_0 は風速が零の時の通発率で気温, 湿度ならびに輻射強度の函数である。また, 式中の正負の記号のうち, 正の記号は輻射強度が零の場合のみに適用する。この式によつて両樹種についておこなつたそれぞれ 27 回および 26 回の実験に対していちいちその平均誤差を求めてみると, ヤマモモでは最大 0.35 から最小 0.02 の間にあり, スギでは最大 0.20 から最小 0.01 の間にあつて, (8) および (9) 式が非常によく実験結果を表わすことがわかつた。

そこで前項 6 の (4) および (5) 式を誘導するに用いた実験結果を (8) および (9) 式によつて補正し, 風速が零の時の通発率 T_0 を表わす式を求め, 両樹種の通発率を計算するに必要な諸式を列挙すると下記のごとくなる。

ヤマモモの場合:

$$\left. \begin{aligned} T_0 &= (2.09R + 1.67) H_d + 35.62R \\ \text{ここで,} \\ H_d &= e_s (1 - H_r) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (10)$$

および,

$$\left. \begin{aligned} T &= T_0 + v / (av + b) \\ \text{ここで,} \\ a &= 0.55 \times 10^{-1.37R} \\ b &= 0.32 \times 10^{-2.35R} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (11)$$

スギの場合：

$$\left. \begin{aligned} T_0 &= (0.14 R + 0.35) H_d + 3.08 R \\ \text{ここで, } H_d &= e_s (1 - H_r) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

および,

$$\left. \begin{aligned} T &= T_0 + v \cdot (av + b) \\ \text{ここで, } a &= 2.77 \times 10^{-0.96 R} \\ b &= 2.16 \times 10^{-1.45 R} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

ただし, R は $\text{cal/cm}^2/\text{min}$ で表わした輻射強度, e_s はその時の気温に相応する大気中の水蒸気の最大張力 (mmHg), H_r は百分率を取らないで表わした関係湿度の値で 0~1 の範囲内の値, v は m/sec で表わした風速である。

8. 葉面温度と通気率ならびに周辺条件との関係

太陽輻射を受けつつある葉の温度は, その熱作用のために上昇し, 通気による冷却作用によつては下降することは多くの研究者の報告を見ても明らかである。たとえば, MILLER and SAUNDERS²³⁾ は穀類の凋萎した葉と凋萎しない葉との温度を熱電対で比較して凋萎した葉の温度が凋萎しない葉の温度よりも常に高いことを示し, CLUM⁶⁾ は *Fuchsia speciosa*, *Phaseolus vulgaris*, *Brassica oleracea*, および *Syringa vulgaris* の葉温度をやはり熱電対で測定して太陽輻射のもとでは戸外で最大 13.1°C , 温室内では最大 16°C 気温よりも高かつたと報告している。しかし彼の実験では, 通気率ならびに葉温度と気温との差の間, または2つの葉または2つの植物の通気率とそれらの葉温度差との間には一定の相関関係が見いだされていない。COPELAND⁷⁾ は普通の寒暖計に Chaparral shrubs の葉を巻きつけてその温度を測定し, 直射光線のもとでは, ある場合には日陰の気温より 10°C も高く, また活潑に通気しつつある葉においては, ある場合には冷却効果は 10°C 以上にも達したと報告している。また MARTIN¹⁹⁾ は, *Helianthus annuus* の葉の温度を熱電対によつて測定し, 太陽光線に直角に向いた葉では気温よりも平均 1°C 高かつたが, テントの中にある葉では約 5°C も低かつたと報告している。このように葉温度と通気率ならびに周辺条件との関係については充分なる結果が得られていない。これは葉温度が一枚一枚の葉によつて異なることに大きな原因があるものと思われる。

そこで筆者は B. S. No. 36 の銅—コンスタンタン熱電対を 20 対直列に結び, その一方の端をそれぞれ 20 枚の異なる葉の表面にさし込み, 他端を束ね, かつ直射を遮蔽して切枝の中心付近の空気中につるし, 気温と葉面温度との差をヤマモモおよびスギについて測定した。すなわち, 20 枚の葉の平均温度と気温との差を観測したわけである。その結果を次に報告する。なお, 簡単のために以後この葉温度と気温との差を葉温差と呼ぶことにする。

Fig. 46 はヤマモモの切枝について 1953 年 3 月 20 日から同年 4 月 9 日までの間に 13 回, Fig. 47 はスギの切枝について 1954 年 2 月 24 日から同年 4 月 16 日までの間に 16 回, それぞれ一定風速 0.5 m/sec および 2 m/sec のもとで葉温差と輻射強度との関係についておこなった実験のうちの各一例である。図のように, この関係はいずれの樹種においてもほとんど例外なく直線で最もよく表わされた。また同時に図示したように, その時の通気率も同様に輻射強度に直線的に比例するから, 葉温差と通気率とは必然正比例することになる。また, 葉温差はある輻射強度以下では負になるが, -3°C を超過することは

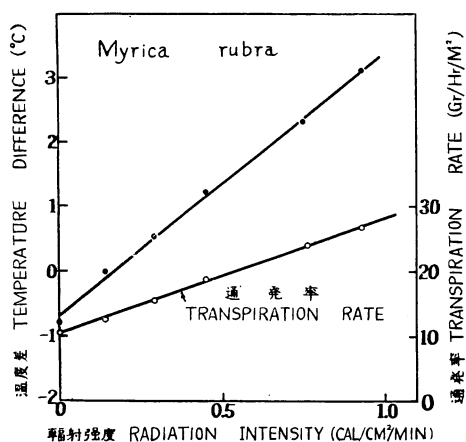


Fig. 46 葉面温度と気温の差および通気率と輻射強度との関係, 1953年3月28日測定, 室内実験, 気温 25°C, 関係湿度 80%, 風速 0.5 m/sec

Relations of difference between leaf temperature and air temperature and transpiration rate to radiation intensity. Mar. 28, 1953, laboratory experiment. Air temperature, 25°C. Relative humidity, 80%. Wind velocity, 0.5 m/sec.

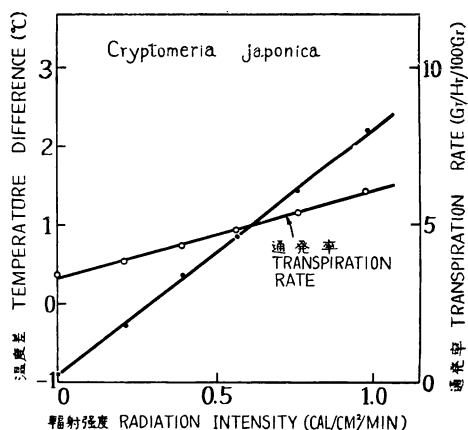


Fig. 47 葉面温度と気温の差および通気率と輻射強度との関係, 1954年4月14日測定, 室内実験, 気温 35°C, 関係湿度 40%, 風速 2 m/sec

Relations of difference between leaf temperature and air temperature and transpiration rate to radiation intensity. Apr. 14, 1954, laboratory experiment. Air temperature, 35°C. Relative humidity, 40%. Wind velocity, 2 m/sec.

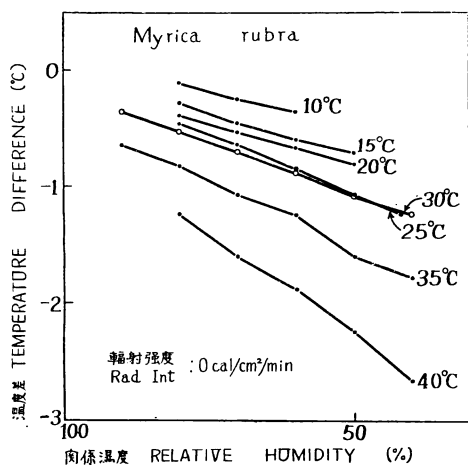


Fig. 48 葉面温度と気温の差の気温並びに関係湿度に対する関係, 1953年3月26日~4月8日測定, 室内実験, 風速は0.5 m/sec

Relations of difference between leaf temperature and air temperature to air temperature and relative humidity. Mar. 26 to Apr. 8, 1953, laboratory experiment. Wind velocity, 0.5 m/sec.

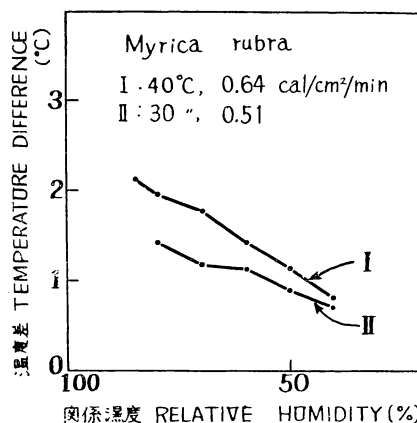


Fig. 49 葉面温度と気温の差の関係湿度に対する関係, 1953年3月26日~4月8日測定, 室内実験, 風速は 0.5 m/sec

Relation of difference between leaf temperature and air temperature to relative humidity. Mar. 26 to Apr. 8, 1953, laboratory experiment. Wind velocity, 0.5 m/sec.

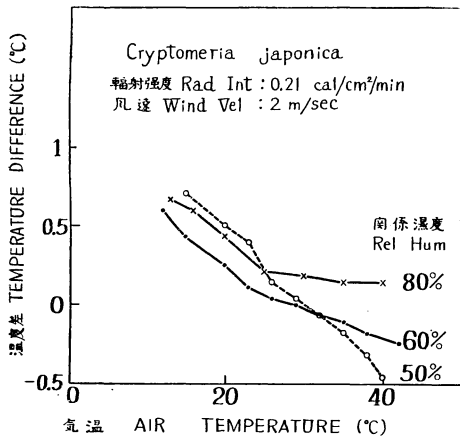


Fig. 50 葉面温度と気温の差の気温並びに関係湿度に対する関係, 1954年2月25日～3月3日測定, 室内実験

Relations of difference between leaf temperature and air temperature to air temperature and relative humidity. Feb. 25 to Mar. 3, 1954, laboratory experiment.

少し, 関係湿度の減少に伴つてはほぼ直線的に減少している。これらの傾向は通発率の場合とは全く正反対である。

以上の結果を総合してみると, 葉の温度は大気中の水蒸気の飽和不足量の増加とともに減少し, その全

なかつた。以上の結果から見ると, 輻射による通発率の上昇は葉面温度の上昇に深い関係を有するものようである。

Figs. 48～50 は葉温差と気温 ならびに湿度との関係である。Figs. 48 および 49 はヤマモモの切枝について 1953 年 3 月 26 日から同年 4 月 8 日までの間に 25 回, Fig. 50 は スギの切枝について 1954 年 2 月 25 日から同年 3 月 3 日までの間に 3 回, それぞれ一定風速 0.5 m/sec および 2 m/sec のもとでおこなつた実験のうちの 9 回および 3 回の結果を示している。Fig. 48 は輻射強度が零の場合で, Fig. 49 は 0.51 および 0.64 cal/cm²/min の場合を示す。前者では葉温差は全部負, 後者では全部正で, その中間の輻射強度 0.21 cal/cm²/min のもとの Fig. 50 スギでは葉温差は気温の上昇とともに正から負に変つてゐる。そしてこれらの曲線の傾向から見ると, 葉の温度は気温の上昇に伴つて加速的に減少し,

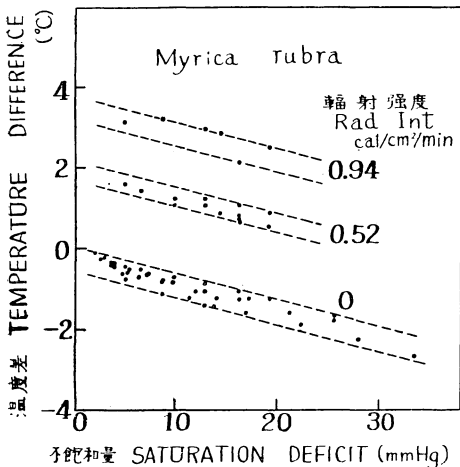


Fig. 51 葉面温度と気温の差の飽和不足量に対する関係, 風速は 0.5 m/sec

Relation of difference between leaf temperature and air temperature to saturation deficit of atmosphere. Wind velocity, 0.5 m/sec.

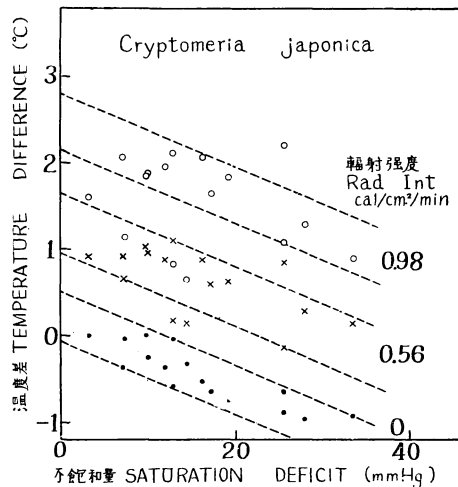


Fig. 52 葉面温度と気温の差の飽和不足量に対する関係, 風速は 2 m/sec

Relation of difference between leaf temperature and air temperature to saturation deficit of atmosphere. Wind velocity, 2 m/sec.

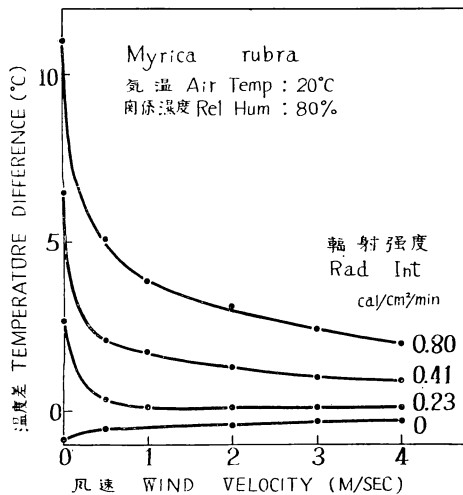


Fig. 53 葉面温度と気温の差の風速に対する関係, 1954 年 1 月 21 日～3 月 17 日測定, 室内実験

Relation of difference between leaf temperature and air temperature to wind velocity. Jan. 21 to Mar. 17, 1954, laboratory experiment.

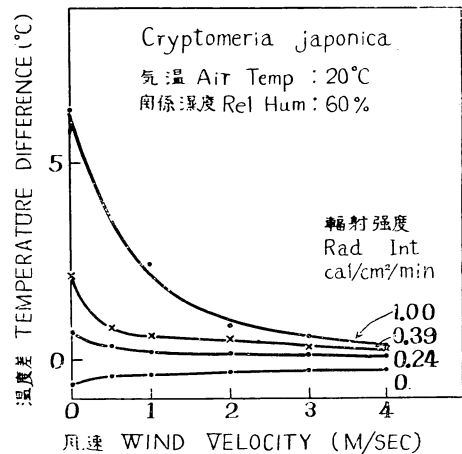


Fig. 54 葉面温度と気温の差の風速に対する関係, 1954 年 2 月 1 日～3 月 31 日測定, 室内実験

Relation of difference between leaf temperature and air temperature to wind velocity. Feb. 1 to Mar. 31, 1954, laboratory experiment.

体の高さは輻射強度に比例して上昇することが推測される。そこで、そのことを確かめるために、以上の実験値を整理して、輻射強度を $0.1 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$ の範囲ごとに分割し、その範囲内にある葉温差の値と飽和不足量との関係を調べてみた。その一部を Figs. 51 および 52 に示す。図中に示した輻射強度の値は各点の輻射強度の平均値である。このように予想どおり葉の温度は飽和不足量に正比例して減少し、輻射強度の増加とともにほぼ直線的に全体が上昇することがわかった。

Figs. 51 および 52 からみると、この関係を表わす直線の傾斜は輻射強度には無関係に一定しているようである。もしそうであるとするならば、Figs. 46 および 47 に示した葉温差と輻射強度との関係を表わす直線の傾斜は、一定風速のもとでは気温ならびに湿度には無関係であることになる。そこで筆者は前に述べたヤマモモおよびスギについての 13 回および 16 回の実験結果からそれぞれの傾斜を最少自乗法によつて計算し、その値と気温ならびに関係湿度との相関関係を調べてみたが、はたして特別の相関関係を見いだすことはできなかった。

つぎに残された問題は葉温差と風速との関係である。これについては 1954 年 1 月 21 日から同年 3 月 17 日までの間にヤマモモの切枝について 25 回、1954 年 2 月 1 日から同年 3 月 31 日までの間にスギの切枝について 21 回の実験をおこなった。そのうち、それぞれ 4 回の実験結果のみを Figs. 53 および 54 に示した。

このように葉温差と風速との関係は、通発率と風速との関係に酷似している。すなわち、風速が葉温差に及ぼす影響は、低風速で激しく、 1 m/sec 以上の風速では大なる変化を与えない。また、輻射強度が零の時には葉温は風速によつて上昇し、反対に輻射強度が大になるにしたがつてますます激しく葉温は引き下げられることがわかる。すなわち、葉温が通発作用によつて気温以下に引き下げられている時には、風は空気の環流を促して空気の熱を葉面に伝える作用をなし、逆に輻射によつて熱せられた葉面からは、熱

を奪つて常に葉温度を気温に等しくしようとする作用をするもののである。そして、通発率も常にこの葉温の変化に伴つて上下するものように思われる。すなわち、風速をかえた場合に輻射強度が零の時には通発率が上昇し、輻射強度が大になるにしたがつて通発率はますます激しく下降する原因の一つはこの葉温度の作用によるものと考えられる。

以上述べてきたように、葉温差と通発率ならびに周辺条件との間には密接な関係があることがわかる。そして平均の葉温度は通発率ならびに周辺条件の変化に伴なつて規則正しく変動するものであることもうかがわれる。しかしながら、上述した結果はヤマモモの場合には切枝の全葉枚数 80~250 枚のうちのわずか 20 枚についての平均葉温差、スギではさらに莫大な数の針葉のうちのわずか 20 本についての平均葉温差であるから、その値がはたして切枝全体の平均葉温差を示しているかどうかはうたがわしい。

9. 結 言

以上のようにヤマモモならびにスギの通発率と輻射強度、気温、湿度および風速との間には、切枝によつてその通発率の大きさにはかなりの個体差があるにもかかわらず、個々の切枝に対しては規則正しい相関関係が存在することがわかる。また個体差がかなりあつた原因の一つとしては、1本の立木から試料を採取する際に、わざと立木を東西南北および上部、中部、下部にわけて、その都度それらを順々にとりまぜて採取したことが考えられる。そうすることによつて、筆者は測定結果の平均値をできるだけ立木全体の平均値に接近させようとしたのである。1本の立木における枝の位置によつて切枝に個体差の現われることについては、門田¹⁴⁾のクロマツについての測定結果においても現われているが、それらの個体差はこの研究の障害になるほどの大きさではない。しかも、同一個所から採取された切枝においてすでにそれに近い個体差が現われるので、筆者は上に述べたような方法を採用したわけである。

この研究において筆者は気温ならびに湿度と通発率との関係からと、輻射強度と通発率との関係からと、二様の方法によつて通発率の算定式を誘導しようとした。しかし前者の方法では誤差が大きくなるおそれがあつたので、後者の方法によつて算定式を導くことにし、両樹種の一定風速下における通発率を輻射強度、気温ならびに湿度の函数として表わした。なお、前者の方法を用いてもこれと同一の結果になることは明らかである。

さらに通発率と風速との関係についても、それぞれの樹種について一定の関係式が誘導された。そこで、これらの関係式を用いて任意の気象条件下における、両樹種の通発率を算定することは可能となつた。

さらに筆者は葉面温度と通発率ならびに輻射強度、気温、湿度および風速との間の関係を 20 対の銅—コンスタンタン熱電対を用いて測定し、それらの間にも一定の関係のあることを示した。そしてそれらの結果から通発率の変化と葉面温度の変化との間には相互に密接な関係の存在することを述べた。

終りにのぞんで、終始御懇切なる御指導を賜つた北海道大学教授中谷宇吉郎博士ならびに東晃博士および故東京大学教授秋葉満寿次博士、前農林省林業試験場長大政正隆博士に深甚の感謝の意を表する次第である。

文 献

- 1) ARTHUR, J. M., and STEWART, W. D.: Transpiration of tobacco plants in relation to radiant energy in the visible and infra-red. Contrib. Boyce Thompson Instit., 5, (1933). p. 489~501, (cited by Kittredge, 1948)
- 2) BAKKE, A. L.: Studies on the Transpiring Power of Plants as indicated by the Method of Standardized Hygrometric Paper. Journ. of Ecology, 2 (1914). p. 145~173
- 3) BIALOGLOWSKI, J.: Effect of humidity on transpiration of rooted lemon cuttings under controlled conditions. Proc. Am. Soc. Hort. Sci., 33, (1935). p. 166~169 (cited by Kittredge, 1948)
- 4) BLAYDES, G. W.: A survey of rates of water loss from leaves. Ohio Journ. Sci., 28, (1928) p. 99~118
- 5) BRIGGS, L. M., and SHANTZ, H. L.: Hourly transpiration rate on clear days as determined by cyclic environmental factors. Journ. Agr. Res., 5, (1916). p. 533~549
- 6) CLUM, H. H.: The effect of transpiration and environmental factors on leaf temperatures. I. Transpiration. Am. Journ. Bot., 13, (1926). p. 194~216
- 7) COPELAND, E. B.: Transpiration by chaparral and its effect upon the temperature of leaves. Univ. Calif. Pub. Botany, 17, (1932). p. 1~21
- 8) CRIBBS, J. E.: Ecology of *Tilia americana*. I. Comparative studies of the foliar transpiring power. Bot. Gaz., 68, (1919). p. 262~286
- 9) —————: Ecology of *Tilia americana*. II. Comparative studies of the foliar transpiring power. *ibid.*, 71, (1921). p. 239~313
- 10) DANIEL, T. W.: The comparative transpiration rates of several western conifers. Univ. Calif., (cited by Kittredge, 1948)
- 11) DOLE, E. J.: Studies on the effects of air temperature and relative humidity on the transpiration of *Pinus strobus*. Vermont Agr. Exp. Sta. Bull., 238, (1924). (cited by Meyer, 1932)
- 12) FOWLE, F. E.: Smithsonian Physical Tables. Smithsonian Instit., Wash., (1934).
- 13) IVANOV, L. A., und THIELMANN, M.: Über den Einfluss des Lichtes verschiedener Wellenlänge auf die Transpiration der Pflanzen. Flora, 116, (1923). p. 296~311
- 14) Kadota, M.: The transpiration of Japanese black pine. Bull. Physiographical Sci. Res. Instit., 4, (1950). p. 41~48 (in Japanese with English summary)
- 15) KITTREDGE, J.: Forest Influences. McGraw-Hill Book Co., N. Y., (1948)
- 16) LECLERC du SABLON, M.: Sur les causes du dégagement et de la rétention de vapeur d'eau par les plantes. Rev. Gén. Bot., 25, 49~83 et 104~122, (1913)
- 17) LEPESCHKIN, W. W.: Light and the permeability of protoplasm. Am. Journ. Bot., 17, (1930). p. 953~970
- 18) LIVINGSTON, B. E., and SHREEVE, E. B.: Improvement in the methods for determining the transpiring power of plant surfaces by hygrometric paper. Plant World, 19, (1915) p. 237~309 (cited by Shapiro and DeForest, 1932)
- 19) MARTIN, E. V.: Effect of solar radiation on transpiration of *Helianthus annuus*. Plant Physiol., 10, (1935). p. 341~354
- 20) —————: Studies of evaporation and transpiration under controlled conditions. Carnegie Instit. Wash. Pub., 550, (1943). (cited by Kittredge, 1948)

- 21) MEYER, A. F.: The Elements of Hydrology. John Wiley & Sons, N. Y., (1928)
- 22) MEYER, B. S.: The daily periodicity of transpiration in the tulip poplar (*Liriodendron tulipifera* L.). Ohio Journ. Sci., 32, (1932). p. 104~114
- 23) MILLER, E. C., and SAUNDERS, A. R.: Some observations on the temperature of the leaves of crop plants. Journ. Agr. Res., 26, (1923). p. 15~43
- 24) NAKAYAMA, M., and KUDOTA, M.: The Wind influence on the Transpiration of some Trees. (No. 1), Bull. Physiographical Sci. Res. Instit., 1, (1943). p. 17~34 (in Japanese with English résumé)
- 25) —————: The influence of the Wind on the transpiration of some trees. (No. 2), *ibid.*, 2, (1949). p. 10~17 (in Japanese with English summary)
- 26) RENNER, O.: Beiträge zur Physik der Transpiration. Flora, 100, (1910) p. 451~547
- 27) ROESER, J. J.: Transpiration capacity of coniferous seedlings and the problem of heat injury. Journ. Forestry, 30, (1932). p. 381~395
- 28) SATOO, T.: Factors affecting the change in rate of water absorption by shoots of *Cryptomeria japonica* with respect to the exposure to artificial wind. Journ. Jap. Forest. Soc., 30, (1948). p. 26~32
- 29) —————: Effect of Wind and Temperature Surrounding Roots on Transpiration of Plants in Dormant Season. Bull. Tokyo Univ. Forests, 36, (1948). p. 20~28
- 30) —————: Effect of Wind on Transpiration of New and Old Leaves of Some Trees. *ibid.*, 36, (1948). p. 30~34
- 31) —————: Effect of Wind and Soil Moisture on Growth of Seedlings of *Robinia pseudacacia*. *ibid.*, 36, (1948). p. 36~40 .
- 32) —————: Relation between Rate of Transpiration and Rate of Absorption of Water in Seedlings of *Cryptomeria japonica* Exposed to Artificial Wind. *ibid.*, 34, (1949). p. 19~30
- 33) —————: Zyoohatumen no Atumari ni taisuru Kaze no Hataraki. *ibid.*, 37, (1949) p. 31~40 (in Romaji with English abstract)
- 34) —————: Notes on the Water Relations of Trees in Windbreaks. Miscellaneous Information, Tokyo Univ. Forests, 9, (1952). p. 25~30 (in Japanese with English résumé)
- 35) —————: Influence of Wind on Transpiration of Seedlings of *Cryptomeria japonica* grown under Different Soil Moisture Conditions. Bull. Tokyo Univ. Forests, 44, (1953). p. 1~6
- 36) SAYRE, J. D.: Factors controlling variations in the rate of transpiration. Ohio Journ. Sci., 19, (1919). p. 491~509 (cited by Meyer, 1932)
- 37) SEYBOLD, A.: Die physikalische Komponente der pflanzlichen Transpiration. Julius Springer, Berlin, (1929). p. 1~214
- 38) —————: Die pflanzliche Transpiration. Ergebnisse d. Biologie, 5, (1929) p. 29~165
- 39) —————: Die pflanzliche Transpiration. *ibid.*, 6, p. 559~731 (1930)
- 40) SHAPIRO, A. A., and DEFORREST, H.: A comparison of transpiration rates in chaparral. Ecology, 13, (1932). p. 290~295
- 41) THORNTON, C. W.: Atmospheric turbulence and the measurement of evaporation. Proc. Second Hydraulics Conf., Iowa Univ. Studies, Eng. Bull., 27, (1943). (cited by Kittredge, 1948)
- 42) THORNTON, C. W. and HOLZMAN, B.: Measurement of evaporation from land and water surfaces. U. S. Dept. Agr. Tech. Bull., 817, (1942). (cited by Kittredge, 1948)

- 43) WILSON, H. W.: Studies on the transpiration of some australian plants, with notes on the structure of their leaves. *Proc. Roy Soc. Victoria*, **36**, (1924). p. 175~237 (cited by Meyer, 1932)
- 44) WILSON, J. D., and LIVINGSTON, B. E.: Lag in Water Absorption by Plants in Water Culture with respect to Changes in Wind. *Plant Physiol.*, **12**, (1937). p. 135~150
- 45) WRENGER, M.: Über den Einfluss des Windes auf die Transpiration der Pflanzen. *Zeitschr. f. Bot.*, **29**, (1935) p. 257~320

Research materials

Measurement of the Total Transpiration from a Forest. (Part 6)

Studies on the rate of transpiration as the function
of environmental factors under controlled conditions.

Yoshito YAMAOKA

(Résumé)

1. Introduction.

As the transpiration rate measured by the potometer method agrees within an error of $\pm 2.4\%$ with the value under natural state, as has been already dealt with in detail in Part 5, the author has proceeded to investigate the relations between transpiration rate and various environmental factors under controlled conditions. It has already been reported by many of the investigators such as, Briggs and Shantz⁵⁾, Sayre²⁶⁾, Cribbs⁸⁾⁹⁾, Dole¹¹⁾, Wilson¹³⁾, Blaydes¹⁾, Meyer²²⁾, and others, that the transpiration rate shows a daily periodicity, and the correlation between this daily periodicity and environmental conditions has been investigated by Shapiro and De Forest¹⁰⁾ by the cobalt chloride paper method (Bakke³⁾, Livingston and Shreve¹³⁾ with respect to eight species of chaparral plants. Kadota¹⁴⁾ has also observed the daily periodicity of the transpiration rate in his investigation on Japanese black pine. In the early observation performed by the author with respect to *Myrica rubra*, it was observed that the same daily periodicity of transpiration rate exists.

As to the origin of this daily periodicity of transpiration rate, it can be considered that this owes mainly to the daily periodicity of environmental factors such as air temperature, relative humidity, radiation intensity, and wind velocity. Several investigations with regard to the effects of these environmental factors on the transpiration rate have been made.

Meyer²¹⁾, Thornthwaite and Holzman¹²⁾, Thornthwaite¹¹⁾, and others, investigated the effect of air temperature on transpiration rate, and the trends were represented by the convenient form of linear relations. But the gradually accelerating tendency of transpiration rate with the increase of air temperature can be seen in the results of laboratory experiments by Roeser²⁷⁾ with respect to Lodgepole pine, Engelmann spruce, Douglas fir, and Western yellow pine.

Martin²⁰⁾, Bialoglowski³⁾, and others, showed the linear relation between transpiration rate and relative humidity. But the trends were not straight in Daniel's¹⁰⁾ experimental results on five species. (by Kittredge¹⁵⁾)

Arthur and Stewart¹⁾, Martin¹⁹⁾, and others, investigated the effect of radiation intensity on transpiration rate. The influence of radiation on the rate of transpiration of *Helianthus annuus* under natural conditions was investigated by Martin, using shade tents constructed so as to transmit different amounts of radiation, and to permit such freedom of air circulation that other environmental factors were not altered appreciably, and found the relation between radiation intensity and transpiration rate to be linear within the limits of experimental error.

As to the effect of wave length of light, Leclerc du Sablon¹⁶⁾ suggested that the accelerating effect of radiation on transpiration rate may be due partly to heating of the leaves and partly to a change in the permeability of the protoplasm. Ivanov and Thielmann¹³⁾ showed that the transpiration rate under blue-violet light could be accelerated to the extent

of 50 or 60% as compared with that under red-yellow light of the same intensity. Lepeschkin¹⁷⁾, showed that the permeability of the protoplasm of *Elodea* leaves increases under methylene blue light with increase of the light up to 10% of full sunlight, but beyond this intensity the change in the permeability of protoplasm is very little.

As to the effect of the wind velocity, several investigations have been performed by Renner²⁵⁾, Seybold²⁷⁾³³⁾³⁹⁾, Wrenger¹⁵⁾, Wilson and Livingston¹¹⁾, Nakayama and Kadota²⁴⁾²⁵⁾, Satoo²⁸⁻³⁵⁾, and others. And according to the report by Renner, the effect of wind on the transpiration rate of *Rhododendron hybridum* was indistinct under scattered light. Seybold reported that the transpiration rates of plants mainly composed of cuticular transpiration were increased by the wind, but the effect of wind on the transpiration rates of plants mainly composed of stomatal transpiration were small. Wrenger investigated the effect of wind on 33 species, including *Helianthus annuus* and others, in the laboratory, and showed that the transpiration rates once attain the maximum values proper to the species (12—150%) after 10 or 15 minutes by the influence of wind, and gradually decrease there after. According to the experimental results on Japanese pine trees performed by Nakayama and Kadota, the effect of wind on transpiration rate differs according to the time of the day, and the transpiration rate in the afternoon decreases or increases by the influence of wind depending upon fine or cloudy weather, respectively. The measurement of the lag period of the transpiration rate caused by the change of wind velocity was performed by Wilson and Livingston with respect to willow, and by Satoo with respect to *Cryptomeria japonica*. Satoo³⁰⁾ also reported that the effect of wind is larger on new leaves than on old leaves, and he also performed some experiments on a leaf model³³⁾.

As has been described above, the reports with regard to the effect of environmental conditions on the transpiration rate are numerous. But there are as yet no synthetic results useful in the estimation of the transpiration rate under optional meteorological conditions. For that reason, the author decided to carry out a series of experiments with respect to *Myrica rubra* and *Cryptomeria japonica* in order to obtain the synthetic result necessary to estimate the amount of transpiration.

2. Transpiration rate under natural conditions.

It is necessary to investigate the relations between transpiration rate under natural conditions and meteorological conditions before starting our laboratory experiments, in order to obtain some rough information in advance about the relations between transpiration rate and environmental conditions. The following two examples show the results of experiments carried out in the open with respect to the cut shoots of *Myrica rubra* mounted in potometers.

Fig. 1 shows one of the results obtained on Dec. 4, 1951. The total leaf areas of cut shoots A and B are 1120.6 cm² and 870.5 cm², respectively. But there is no remarkable discrepancy among the values of both transpiration rates, as can be seen in Fig. 1, and moreover, transpiration curves A and B follow approximately parallel courses. As can be seen, the variation of transpiration rate has correlated with the variation of the intensity of solar radiation and the air temperature, the former variation following about 10 minutes behind the latter variation.

The comparison of the transpiration rate inside and outside of the crown was then investigated, as shown in Fig. 2, on cut shoots of *Myrica rubra* on Oct. 17, 1951 (fair). It is surprising that the transpiration rates differ to such an extent shown in Fig. 2. Curves

A, C, and B' are the transpiration curves of cut shoots mounted in potometers and placed *in situ*. But curves B, A', and C' are the transpiration curves of cut shoots mounted in potometers and placed on earth about 2 meters apart from the parent tree. The transpiration rate of curve A is more than double that of curve C, however the shoots are both in the crown. It seems probable that the occurrence of such a large discrepancy was due to the fact that the cut shoot A was put in full sunlight, whereas the cut shoot C was put in the shade. As evidence, the transpiration rate of cut shoot B in full sunlight on earth approximately agrees with that of cut shoot A.

In the second place, the cut shoots in the crown were placed on earth and the cut shoots on earth were placed in the crown *in situ*, at the instant shown by the small arrow heads in the figure. As the result of this, the transpiration rate of cut shoot A was decreased and that of cut shoot C was increased to an approximately comparable value. The transpiration rates of cut shoots B' and C both placed in shade approached to nearly the same value. Thus, the transpiration rate differs widely according to the position of cut shoot in the crown and to the different conditions inside or outside of the crown. The effect of the intensity of solar radiation would be considered as the main origin of this large discrepancy in transpiration rate. The values of air temperature, relative humidity, and wind velocity in Fig. 2 are of no avail in explaining these discrepancies, for they were measured in the open shade from beginning to end of the experiment.

Furthermore, an experiment was carried out on *Myrica rubra* in the open on Oct. 31, 1951 (fair) in full sunlight in order to investigate the effect of solar radiation on transpiration rate. Fig. 3 shows the result. The solar radiation was suddenly screened by a sheet of drawing paper hung in front of the potometer at about one meter away from the potometer at the instant shown by a small arrow head (12 : 33 A. M.) in the figure. As a result, the transpiration rate fell to the value equal to 35.5 gr/hr/m^2 from 53.2 gr/hr/m^2 about 10 minutes after the screening. Thus, the transpiration rate of *Myrica rubra* had varied appreciably because of the change of intensity of solar radiation. And the necessary time lag of the transpiration rate to follow the change of intensity of solar radiation was about 10 minutes.

As the transpiration rates under natural conditions are affected simultaneously by the complicated change in the environmental conditions as shown above, it is difficult to separate these effects of environmental conditions from such a simple experiment. For that reason, the author carried out an investigation with the aid of a hand-made small Göttingen-type wind tunnel explained in the next article.

3. Experimental apparatus and the measuring methods.

Fig. 4 is a plan view of a hand-made small Göttingen-type wind tunnel. Part A is the measuring chamber enclosed in glass plates at its fore side and upper side. A cut shoot mounted in a potometer was placed in this chamber after being mounted in a stand illustrated in Fig. 2, Part 5, and the readings of the potometer were taken through the fore side window. The dimensions of this chamber are 63 cm in height, 46 cm in breadth and 46 cm in length. The circuit length of the wind tunnel is 4.7 meters, and the wind velocity at the center of chamber A can be varied, by operating the ventilator B, to an extent of 0 to 4 m/sec. Four plates E, F, G, and H at each corner of the wind tunnel are the guide vanes. The wall of the wind tunnel is made in double wall construction, except around the chamber A, in order to maintain the inner air temperature and relative humidity as constant as

possible.

Fig. 5 shows the electric circuit arrangements and the pipings of the automatic controlling devices. There are automatic controlling heads B and C respectively for air temperature and relative humidity, calcium chloride container E, electric heater F, thermopile radiometer D, agitating fan G, rotating vane type anemometer. Lambrecht's hygrometer and bulb thermometer in the chamber A were conveniently arranged in their proper positions. The controlling heads B and C operate the relays O, P and U, V, respectively, and by the action of electric motors R, Q and three way cock W, T, X, the air temperature and the relative humidity in wind tunnel are automatically controlled. M is an ice box and S is a small boiler; L₁ to L₈ show eight of the electric lamps, 500 watts in each, and H is the water-filter. I is a constant-water-head tank supplying water in the water-filter H; J is an automatic recorder of the thermopile radiometer D, and K₁ to K₁₇ show the electric keys in the whole works. The water-supply in the potometer can be conducted by a small rubber tube inserted from the exterior into the chamber A.

The author has investigated the relation between transpiration rate and various environmental factors one by one, using the above described wind tunnel which can change individually the radiation intensity, air temperature, relative humidity, and wind velocity at will, and also can maintain the environmental conditions in any desired state automatically for a long while.

The small agitating fan G installed in the chamber A was not utilized after the commencement of our experiment, for the fan G disturbs the air flow in the wind tunnel.

4. Lag period of transpiration rate caused by the change of environmental conditions.

Before starting our experiments, it is necessary to measure the lag period of transpiration rate caused by the change of environmental conditions. These lag periods of transpiration rate were measured on *Myrica rubra* changing the air temperature, relative humidity, and wind velocity in wind tunnel one by one. The results are shown in Figs. 6 to 8.

Figs. 6 to 8 show the results of laboratory experiments with respect to the lag periods caused by the changes of air temperature, relative humidity, and wind velocity, respectively. In these cases, it is essential to spend a few minutes in order to change the air temperature or relative humidity or wind velocity in the wind tunnel. Accordingly, the lag periods will be somewhat extended. But in spite of these disadvantageous conditions, the lag periods were 6.5, 7.5, and 10 minutes, respectively, as shown in each figure.

Thus, the lag periods of transpiration rate in the case of changing the environmental factors one by one can be considered as 6.5 to 10 minutes.

5. Relations of the transpiration rate to air temperature and relative humidity.

Meyer²¹⁾ and others represented the relation between transpiration rate and temperature by a convenient form of linear trend, but it appeared in more complicated form in our investigations on *Myrica rubra* and *Cryptomeria japonica*.

Fifteen experiments were carried out on *Myrica rubra* during the period from Feb. 11 to Mar. 9, 1953 under constant wind velocity of 0.5 m/sec, and 4 experiments on *Cryptomeria japonica* from Feb. 25 to Mar. 3, 1954 under constant wind velocity of 2 m/sec, changing air temperature under constant radiation intensity and relative humidity. But only 5 among 15 experimental results are shown in Fig. 9 with respect to *Myrica rubra*, and all of the results in Fig. 10 in the case of *Cryptomeria japonica*. It is obvious that the trends are not linear in these species, but the transpiration rate increases acceleratively with higher

air temperature, and the whole height of the curve tends to rise with lower relative humidity. And furthermore, there are two points of inflection in most cases on the transpiration curves; their positions seem to be fixed at certain temperatures. The reversal of the curves under relative humidity of 70 % and 80 % is an exception. But it is not in general, as can be understood from the relation of transpiration rate to relative humidity.

With regard to the relation between transpiration rate and relative humidity, 22 experiments were carried out on *Myrica rubra* during the period from Feb. 24 to Apr. 8, 1953 under constant wind velocity of 0.5 m/sec, and 5 experiments on *Cryptomeria japonica* from Mar. 5 to Mar. 20, 1954 under constant wind velocity of 2 m/sec, changing relative humidity under constant radiation intensity and air temperature. Only 7 results in dark and 7 other results under the radiation intensity of 0.21 cal/cm²/min are shown in Figs. 11 and 12, respectively, with respect to *Myrica rubra*, but all of the results are given in Fig. 13 in the case of *Cryptomeria japonica*. In all cases, the relations between transpiration rate and relative humidity are best represented graphically by straight lines. The gradients of these straight lines increase not only with higher air temperature but also with higher intensity of radiation.

Thus, the relations of the transpiration rate to air temperature and relative humidity are complicated. But there is a scientific phenomenon given semblance in these happenings. It is the saturation deficit of the atmosphere.

Figs. 14 and 15 show the theoretical relations of the saturation deficit to air temperature and relative humidity drawn from the tables in Fowle's "Smithsonian Physical Tables"¹²⁾. The only difference between both phenomenon is the missing of points of inflection in the latter.

Now we can divide the curves in Figs. 9 and 10 into two parts, as shown in Figs. 16 to 17 and Figs. 18 to 19, respectively; the first part is in direct proportional relation to the saturation deficit, and the second part is its residuals.

Figs. 16 and 17 show the main part of the curves in Figs. 9 and 10, respectively, in direct proportional relation to the saturation deficit, and Figs. 18 and 19 the residual part in oscillatory nature with respect to the air temperature. Accordingly, it may be suggested that the latter part is a component of the transpiration rate relating to something like the regulating action of openings of the stomata of plants which must be related only to the air temperature or to the leaf temperature.

From these results, it can be suggested that the transpiration rate will be roughly in linear relation against the saturation deficit of the atmosphere, as has already been reported by several investigators. In order to confirm this, 67 and 26 experimental results on *Myrica rubra* and *Cryptomeria japonica* were rearranged, respectively. The radiation intensity was divided into 13 steps in the case of *Myrica rubra*, and 9 steps in the case of *Cryptomeria japonica*; the transpiration rate involved in each step was plotted separately against saturation deficit of atmosphere. Fig. 20 shows one example for *Myrica rubra* and Fig. 21 one for *Cryptomeria japonica*.

The points in these figures are scattered to a somewhat large extent as is indicated by the pair of dotted lines. This scattering nature will be due to such effect as, oscillatory nature of the second component of transpiration rate, individual differences in transpiring power of cut shoots, small fluctuations in environmental conditions especially in radiation intensity, experimental errors and so on. But we can not see any oscillatory nature of the

transpiration rate in Figs. 20 and 21 as in the case of Figs. 9 and 10. The fact seems to suggest again that the oscillatory nature depends only upon the air temperature or upon the leaf temperature.

In order to compare the transpiration rate with respect to different combination of wave-lengths of light, two different radiations were used in the case of *Cryptomeria japonica* as have been identified by different marks \times and \cdot in Fig. 21. The first mark \times shows the transpiration rates under the radiation of 1 electric lamp of 500 watts in its capacity without filter, and the second mark \cdot shows the transpiration rates under the radiation of 8 electric lamps, 500 watts in each, totaling to 4,000 watts through a water-filter, but having the same radiation intensity of $0.21 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$ in both cases. That is, in the former case the radiation is abundant in longer wave-lengths, and in the latter case in shorter wave-lengths. But as there are no remarkable discrepancies of transpiration rate between both cases, the effect of wave-lengths of light upon transpiration rate on this species seems not to be important.

Turning now to the relation between transpiration rate T and saturation deficit H_d , the trends can be roughly represented mathematically by equations of the form $T = m_d H_d + n_d$, where m_d is the gradient and n_d is the intercept on the ordinate. The method of least squares was employed in obtaining the values m_d and n_d with respect to the results readjusted in 13 and 9 steps of radiation intensity on *Myrica rubra* and *Cryptomeria japonica*, respectively. And the relations of m_d and n_d to the radiation intensity were investigated. These results are shown in Figs. 22 and 23 in the case of *Myrica rubra* and in Figs. 24 and 25 in the case of *Cryptomeria japonica*.

The trends are linear as regards the relation between m_d and radiation intensity on both species, as shown in Fig. 22 and Fig. 24, but the values of n_d scatter widely in the figures on both species, as can be seen in Fig. 23 and Fig. 25. Of course it is not impossible to derive an equation for estimating the transpiration rate from the relations of m_d and n_d to the intensity of radiation, but it would be liable to permit large errors coming into the result owing to the scattered values of n_d . Consequently, the author decided to search for other functional relations useful in obtaining a more accurate equation for the estimation of transpiration rate.

6. Relation between transpiration rate and radiation intensity.

As it was disadvantageous to derive an equation for the estimation of transpiration rate from the relations of transpiration rate to air temperature and relative humidity, the relation between transpiration rate and radiation intensity was investigated. Before starting our laboratory experiments on this relation, it was necessary to examine the effect of illumination in order to take readings in dark, and the effect of different wave-lengths of light on the transpiration rate.

Figs. 26 and 27 shown the results of experiments carried out on Dec. 4, 1951 and June 30, 1954 with respect to *Myrica rubra* and *Cryptomeria japonica*, respectively, in order to examine the effect of illumination necessary to take readings in dark. Cut shoots of these species were carried into a dark room immediately after the mounting in potometers. And after the transpiration rate had attained the steady value, a 100 watts electric lamp was switched on at the height of about 1 meter above the cut shoot at an instant shown by a small arrow head in the figure. Fig. 26 shows the transpiration curve after the transpiration rate had almost attained the steady value, but Fig. 27 shows the transpiration curve from

10 minutes after the cut of a branch. A lighted match or a pocket electric lamp was used in dark in order to take readings. But the effect of the illumination of a 100 watts electric lamp can scarcely be seen in both figures. Consequently, we can consider that the transpiration rate will not be affected by the illumination of such a degree, or if any, very little. Thereupon, the author carried out his experiment in dark using a 40 watts electric lamp, switching on only in case of taking readings.

In order to examine the effect of wave-lengths of light upon transpiration rate, a 250 watts high pressure mercury lamp was employed besides 8 electric lamps, 500 watts in each, totaling to 4,000 watts, and those were switched on in full throughout the experiment. Switching this mercury lamp on or off, 4 experiments with regard to the effect of wave-lengths of light on transpiration rate were performed with respect to *Myrica rubra* and *Cryptomeria japonica*. Figs. 28 and 29 show the results, one each, for both species performed under the air temperature of 30°C, the relative humidity of 80%, and the wind velocity of 1 m/sec.

“ON” and “OFF” marked in both figures show the instants of switching the mercury lamp on or off under constant radiation intensity of 8 electric lamps. A little effect of the mercury lamp seemingly exists in the case of *Myrica rubra* (Fig. 28), but it is not remarkable as Ivanov and Thielmann¹³⁾ had reported. As to the cause of this effect slightly increasing the radiation intensity owing to the illumination of a mercury lamp, as shown in the figure, some consideration will be given.

In the case of *Cryptomeria japonica*, the effect of mercury lamp on transpiration rate was almost negligible, as in Fig. 29. And it has been pointed out in Fig. 21 (article 5) that the effect of wave-lengths of light on this species is small. Accordingly, the author carried out his investigation with regard to the relation between transpiration rate and radiation intensity under artificial radiation.

On *Myrica rubra*, 27 experiments were carried out during the period from Mar. 10 to Apr. 10, 1953 under constant wind velocity of 0.5 m/sec, and 19 experiments on *Cryptomeria japonica* from Feb. 24 to Apr. 16, 1954 under constant wind velocity of 2 m/sec, changing radiation intensity by switching on or off the 8 electric lamps in turn under constant air temperature and relative humidity. But only 10 among 27 experimental results on the former species are shown in Figs. 30 and 31, and only 9 among 19 experimental results on the latter species in Figs. 32 and 33.

It can be seen in these figures that the trends are best represented graphically by straight lines without exception. Now, if we represent the transpiration rate with T , and the intensity of radiation with R , then the relation will be represented by an equation of the type

$$T = m_r R + n_r, \dots\dots\dots (1)$$

where m_r is the gradient and n_r the intercept on the ordinate. The gradient m_r determines the degree of influence exerted by radiation intensity on transpiration rate, and n_r the transpiration rate under zero intensity of radiation. The values m_r and n_r are both increased with higher air temperature and decreased with higher relative humidity, as can be seen in Figs. 30 to 33, that is, the values m_r and n_r are the functions of air temperature and relative humidity.

Consequently, the method of least squares was employed in obtaining the values of m_r and n_r from 27 and 19 experimental data with respect to *Myrica rubra* and *Cryptomeria*

japonica, respectively. And the factor having a high degree of correlation with these values was sought. The saturation deficit of atmosphere was found to be a factor having a higher degree of correlation with the values of m_r and n_r , as shown in Figs. 34 to 37.

Figs. 34 and 35 show the relations of m_r and n_r to saturation deficit, respectively, on *Myrica rubra*, and Figs. 36 and 37 the same relations with respect to *Cryptomeria japonica*. Obviously there are direct proportional relations in all cases between m_r or n_r and saturation deficit, notwithstanding that the plotted points have scattered to some extent as shown by the pair of dotted lines. The different marks in the figures show that the scattering nature has no direct connection with relative humidity.

Now, considering again the trends as straight lines and employing the method of least squares, the values of gradients and intercepts on the ordinate were calculated, and the empirical formulas of m_r and n_r on both species were obtained as the function of saturation deficit of atmosphere. But it should be noted that the values of two points in Fig. 37 are extremely far apart from the dotted lines and were omitted, and that the equation of straight line representing the relation of n_r to H_d was obtained in type of $n_r = s \cdot H_d$, where s indicates the gradient, for the value n_r is the value of transpiration rate under zero radiation intensity and should be considered as zero when H_d is zero.

For *Myrica rubra* (wind velocity = 0.5 m/sec):

$$\left. \begin{aligned} m_r &= 2.13 H_d + 2.65 \\ n_r &= 1.99 H_d \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

mean error of $m_r = 5.51$

mean error of $n_r = 5.13$

For *Cryptomeria japonica* (wind velocity = 2 m/sec):

$$\left. \begin{aligned} m_r &= 0.14 H_d + 0.15 \\ n_r &= 0.36 H_d \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

mean error of $m_r = 0.57$

mean error of $n_r = 0.88$

By substituting these equations (2) and (3) into equation (1), we can obtain the equations representing the transpiration rate T as the function of radiation intensity R and saturation deficit H_d , on both species, as follows.

For *Myrica rubra* (wind velocity = 0.5 m/sec):

$$T = (2.13 R + 1.99) H_d + 2.65 R \dots\dots\dots (4)$$

mean error of $T = 5.60$

For *Cryptomeria japonica* (wind velocity = 2 m/sec):

$$T = (0.14 R + 0.36) H_d + 0.15 R \dots\dots\dots (5)$$

mean error of $T = 0.97$

where R represents the intensity of radiation in $cal/cm^2/min$ and H_d the saturation deficit of atmosphere in $mmHg$.

The saturation deficit of atmosphere H_d can be represented as the function of saturated vapor pressure e_s ($mmHg$) and relative humidity $H_r \times 100$ (%), as follows.

$$H_d = e_s (1 - H_r) \dots\dots\dots (6)$$

By these equations (4), (5), and (6), we can easily estimate the transpiration rate of *Myrica rubra* and *Cryptomeria japonica* under wind velocity of 0.5 and 2 m/sec, respectively, and under any air temperature, relative humidity, and radiation intensity.

7. Relation between transpiration rate and wind velocity.

As the empirical formulas for estimating the transpiration rate under certain wind velocity were derived as above, we have to investigate in the second place the relation between transpiration rate and wind velocity. For this purpose, 27 experiments were carried out during the period from Jan. 19 to Mar. 17, 1954 with respect to *Myrica rubra* and 26 experiments on *Cryptomeria japonica* during the period from Feb. 1 to Mar. 31, 1954. But only 4 among 27 experimental results on *Myrica rubra* are shown in Fig. 38, and only 4 among 26 experimental results on *Cryptomeria japonica* in Fig. 39.

The transpiration rate decreases rapidly with higher wind velocity within the range of 0—1 m/sec and approaches to a constant value asymptotically within the range of 1—4 m/sec, as can be seen in Figs. 38 and 39. And furthermore, the rate of decrease in transpiration rate diminishes with lower intensity of radiation except in the case of 0 cal/cm²/min. In this exceptional case, 0 cal/cm²/min, the transpiration rate increases on the contrary with higher wind velocity.

Now, in order to obtain the empirical formulas of these curves, let us put v as the wind velocity and represent the transpiration rate at $v=0$ with T_0 and the transpiration rate under certain wind velocity v with T_v , and calculate the value of $v/(T_0 - T_v)$. These values were all plotted against the wind velocity, as shown in Figs. 40 and 41 for example. The curve numbers in Figs. 40 and 41 correspond to those of curves in Figs. 38 and 39, respectively.

The trends are all linear as shown in the figures, and best represented mathematically by the equation of type

$$v/(T_0 - T_v) = a \cdot v + b, \dots\dots\dots (7)$$

where a is the gradient of the straight line and b the intercept on the ordinate. Here again the values of a and b decrease with higher intensity of radiation. The method of least squares was employed in obtaining the values of a and b with respect to 27 and 26 experimental data on *Myrica rubra* and *Cryptomeria japonica*, respectively. And the logarithmic values of a and b were plotted against the radiation intensity, as shown in Figs. 42 to 45.

Obviously the logarithmic values of a and b are in linear relations with the intensity of radiation. And again the gradient and the value of intercept on the ordinate were calculated by the method of least squares. By substituting these values into equation (7), the empirical formulas of transpiration rate T_v can be obtained for both species as the function of the wind velocity v and the radiation intensity R , as follows.

For *Myrica rubra*:

$$\left. \begin{aligned} T_v &= T_0 \mp v / (0.55e^{-3.15R} \cdot v + 0.32e^{-5.41R}) \\ &= T_0 \mp v / (0.55 \times 10^{-1.37R} \cdot v + 0.32 \times 10^{-2.35R}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

For *Cryptomeria japonica*:

$$\left. \begin{aligned} T_v &= T_0 \mp v / (2.77e^{-2.20R} \cdot v + 2.16e^{-3.33R}) \\ &= T_0 \mp v / (2.77 \times 10^{-0.96R} \cdot v + 2.16 \times 10^{-1.45R}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

Where v is the wind velocity in m/sec, R the intensity of radiation in cal/cm²/min, e the base of Napierian logarithm and T_0 is the transpiration rate under zero wind velocity in grams per hour per square meter of leaf area in the case of *Myrica rubra*, or in grams per hour per 100 grams of green leaf weight in the case of *Cryptomeria japonica*. Of course T_0 is the function of air temperature, relative humidity, and radiation intensity. The positive sign among double signs in equations (8) and (9) should be applied only in the case of zero intensity of radiation. By applying the equations (8) and (9) one by one in 27 and 26

experimental results on *Myrica rubra* and *Cryptomeria japonica*, respectively, it was found that the mean errors of transpiration rate lie between 0.02 and 0.35 gr/hr/m² in the case of the former species and between 0.01 and 0.20 gr/hr/100 gr in the case of the latter species. Thus, the equations (8) and (9) represent the experimental results of both species satisfactorily.

Now, modifying the data of 27 and 19 experiments concerning the relation between transpiration rate and radiation intensity with respect to *Myrica rubra* and *Cryptomeria japonica*, respectively, by the equations (8) and (9), we can obtain the equations representing transpiration rate T_0 in the case of zero wind velocity. The following equations are the results when applying the empirical formulas with regard to wind velocity.

For *Myrica rubra*:

$$\left. \begin{aligned} T_0 &= (2.09 R + 1.67) H_d + 35.62 R \\ \text{where, } H_d &= e_s(1 - H_r) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{And } T &= T_0 \mp v/(av + b) \\ \text{where, } a &= 0.55 \times 10^{-1.37 R} \\ b &= 0.32 \times 10^{-2.35 R} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

For *Cryptomeria japonica*:

$$\left. \begin{aligned} T_0 &= (0.14 R + 0.35) H_d + 3.08 R \\ \text{where, } H_d &= e_s(1 - H_r) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{And } T &= T_0 \mp v/(av + b) \\ \text{where, } a &= 2.77 \times 10^{-0.96 R} \\ b &= 2.16 \times 10^{-1.45 R} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

In these equations, R is the intensity of radiation in cal/cm²/min, e_s the saturated vapor pressure of atmosphere in mmHg corresponding to the air temperature at that time, H_r the relative humidity expressed in values from zero to unity, and v the wind velocity in m/sec.

8. Relations of the leaf temperature to transpiration rate and environmental conditions.

It is known that the temperature of a leaf in direct sunlight will be considerably raised by the heating action of solar radiation, but on the contrary it will be reduced by the transpiring action of a leaf. There are few previous works with regard to this problem. Miller and Saunders²³⁾ have shown that the temperature of a wilted leaf is always higher than that of a turgid leaf in the case of crop plants using thermocouple. Clum⁶⁾ measured the temperature of leaves of *Fuchsia speciosa*, *Phaseolus vulgaris*, *Brassica oleracea*, and *Syringa vulgaris* by means of thermocouples, and found that these leaves were nearly always warmer than the air during the day, and in direct sunlight they were frequently warmer than the air from 5 to 10°C, the maximum difference attaining to 13.1°C in the open and 16°C in the greenhouse. But no definite correlation was found between the transpiration rate and the difference between the leaf and air temperature, or between the difference of the transpiration rates of two plants or leaves, and the difference of their temperatures. Copeland⁷⁾ measured the temperature of the leaves of chaparral shrubs by wrapping a leaf around the bulb of a thermometer and reported that the temperature of the leaves of chaparral shrubs in direct sunlight was sometimes higher by as much as 10°C above the shade temperature, the cooling effect of very actively transpiring leaves amounting sometimes to more than 10°C. Also Martin¹⁰⁾ measured the leaf temperature of *Helianthus annuus* with Clements and Martin's thermocouple method and reported that "the temperature of leaves hanging nearly at right angles to the sun's rays in the open averaged about 1°C above that of the air, while that of leaves under tent was about 5°C below." Thus, the leaf tempera-

ture varies widely according to the amount of transpiration and the environmental conditions. But the regular relations of the leaf temperature to transpiration rate and environmental conditions have not yet been found. The author has suggested that these irregularities of results will be due to the fact that the measurement of leaf temperature was made on an individual leaf.

For that reason, 20 thermocouples made of B. S. No. 36 copper and constantan wire were soldered in series, and the difference between mean temperature of 20 leaves and air temperature was directly measured by inserting 20 hot junctions into the surface of 20 different leaves, and hanging 20 cold junctions in a bundle in the free air. In such a manner the measurement of the difference between mean temperature of 20 leaves and air temperature was performed with respect to the leaves of *Myrica rubra* and *Cryptomeria japonica*.

Fig. 46 shows only 1 among 13 results of experiments carried out during the period from Mar. 20 to Apr. 9, 1953 on *Myrica rubra* under constant wind velocity of 0.5 m/sec , and Fig. 47 shows only 1 among 16 results of experiments carried out during the period from Feb. 24 to Apr. 16, 1954 on *Cryptomeria japonica* under constant wind velocity of 2 m/sec , with regard to the relation of the difference between leaf and air temperature to the intensity of radiation. These trends are best represented graphically by straight lines on both species with almost no exception as in Figs. 46 and 47. And it can readily be understood that the difference between leaf and air temperature is in direct proportional relation with the transpiration rate, as the latter is also in linear relation with radiation intensity as shown in the figures. In all cases, the difference between leaf and air temperature became negative with lower radiation intensity, but never exceeded -3°C . Consequently, it seems as if the accelerating effect of radiation on transpiration may be due mainly to the increase of the temperature of leaves.

Figs. 48 to 50 show the relations of the difference between leaf and air temperature to air temperature and relative humidity. Figs. 48 and 49 show 9 among 25 results of experiments carried out during the period from Mar. 26 to Apr. 8, 1953 with respect to *Myrica rubra* under constant wind velocity of 0.5 m/sec , and Fig. 50 shows all of the results of 3 experiments carried out during the period from Feb. 25 to Mar. 3, 1954 with respect to *Cryptomeria japonica* under constant wind velocity of 2 m/sec . The differences between leaf and air temperatures are all negative in the case of zero intensity of radiation as in Fig. 48, but all positive in the case of 0.51 and $0.64\text{ cal/cm}^2/\text{min}$ as in Fig. 49. But in the case of intermediate intensity of radiation, $0.21\text{ cal/cm}^2/\text{min}$, as in Fig. 50 (*Cryptomeria japonica*) this differences changed its sign from positive to negative with the increase of air temperature. And it can also be seen in the figures that the leaf temperature acceleratively decreases with higher air temperature and decreases almost in linear trends with the decrease of relative humidity except in Fig. 50. This tendency is quite opposite to that of the transpiration rate.

Now putting together the results obtained above, it can be suggested that the leaf temperature would be decreased linearly with the increase of the saturation deficit of atmosphere, and the whole trends would be raised with higher intensity of radiation. In order to confirm this, we divided the radiation intensity in steps of $0.1\text{ cal/cm}^2/\text{min}$ and rearranged the experimental data in these steps. The relation of the difference between leaf and air temperature to the saturation deficit was investigated. Figs. 51 and 52 show the parts of the results.

The values of radiation intensity indicated in the figures are the mean values of radiation intensity corresponding to each plotted point. From these results we can understand that not only the leaf temperature decreases in nearly direct proportional relation to the saturation deficit, but also the whole trend rises with higher intensity of radiation, as has already been expected.

The gradients of the straight lines in Figs. 51 and 52 seem to have no connection with the intensity of radiation. Provided that the gradients are constant with regard to the intensity of radiation, the inclination of the straight line representing the relation of the difference between leaf and air temperature to the radiation intensity, shown in Figs. 46 and 47, will have no connection with air temperature and relative humidity under constant wind velocity. Such being the case, the values of gradient with respect to 13 and 16 experiments on *Myrica rubra* and *Cryptomeria japonica*, respectively, were calculated by the aid of the method of least squares. And the relations between those values and air temperature and relative humidity were investigated. But no correlation between them was observed, as was expected.

Finally we have to investigate the relation of the difference between leaf and air temperature to the wind velocity. On *Myrica rubra*, 25 experiments were carried out during the period from Jan. 21 to Mar. 17, 1954 and 21 experiments on *Cryptomeria japonica* from Feb. 1 to Mar. 31, 1954. But only 4 experimental results for each species are shown in Figs. 53 and 54.

These trends resemble closely to that of the relation between transpiration rate and wind velocity. That is, the effect of wind velocity upon the leaf temperature is violent within the range of 0—1 m/sec, but it is very small beyond this wind velocity. And also the leaf temperature increases with higher wind velocity when the radiation intensity is zero, but on the contrary acceleratively decreases with higher intensity of radiation. It seems probable that the wind urges the circulation of air around the leaves to conduct heat from air to leaves' surface when the temperature of leaves is lower than the temperature of surrounding air, but to conduct heat from leaves' surface to air when the temperature of leaves is higher than the temperature of surrounding air, until the equilibrium is attained between the leaf temperature and the air temperature. And it also seems probable that the transpiration rate follows behind the change of the leaf temperature.

As we have described above, there are close correlations between mean temperature of leaves and transpiration rate and environmental conditions. And the relation between mean temperature of leaves and environmental conditions follows a regular trend. But it should be noted that the mean temperature of leaves had been determined by only 20 thermocouples inserted into 20 different leaves; nevertheless the total number of leaves amounted to 80—250 in the case of cut shoots of *Myrica rubra*, and to a countless number of needles in the case of cut shoots of *Cryptomeria japonica*. Accordingly, it is still doubtful whether the measured values will give the true mean temperatures of whole leaves of a cut shoot or not.

9. Conclusion.

There are systematic relations between transpiration rate of cut shoot of *Myrica rubra* and *Cryptomeria japonica* and radiation intensity, air temperature, relative humidity, and wind velocity as stated above; nevertheless, the transpiration rate of individual cut shoot differs tolerably. This individual difference may be due partly to the fact that the cut

shoots were severed from each part of four directions and three steps of height of the crown of the parent tree in sequence. Four directions mean north, east, south, and west and three steps of height mean bottom, middle, and top of the crown. Thus the author has tried to bring the mean value of experimental results closer to the mean value of the transpiration rate of the whole parent tree. With regard to this individual difference of transpiration rate of cut shoot, Kadota¹⁴⁾ investigated with respect to Japanese black pine, but the differences were not so great as to impede our investigation. In addition, the individual difference lies not only on the cut shoot severed from a different part of the crown but also on the cut shoot severed from the same part of the crown. For that reason the author has adopted the method just described above.

In this research the author has tried to derive the empirical formulas necessary to estimate the transpiration rate of *Myrica rubra* and *Cryptomeria japonica* in two ways. But, as the first way to derive the empirical formulas from the relations of the transpiration rate to air temperature and relative humidity was in danger of bringing in an erroneous result, the second way to derive the empirical formulas from the relation of the transpiration rate to the radiation intensity was adopted. And the empirical formulas necessary to estimate the transpiration rate of both species were obtained as the function of radiation intensity, air temperature, and relative humidity under constant wind velocity. In addition, the empirical formulas with regard to the relation of the transpiration rate to the wind velocity were obtained with respect to both species. Consequently, it became possible to estimate the transpiration rate of both species under any meteorological condition.

Furthermore, the relations between temperature of leaves and transpiration rate and environmental conditions were investigated by means of thermocouple method, soldering 20 pairs of copper-constantan thermocouples in series, and showed that the systematic relations hold between them closely correlating to that of the relations between transpiration rate and environmental conditions.

In conclusion, the author wishes to express his gratitude to Dr. U. NAKAYA of Hokkaido University who kindly took a great deal of trouble and effort to help the author throughout the research, and to Dr. A. HIGASHI of the same University, so also to Dr. M. AKIBA of Tokyo University and to Dr. M. OHMASA, the Director of the Government Forest Experiment Station in Tokyo, who kindly led the author in preparing the report.