

樹木の葉温についての観測

大 隅 眞 一

緒 言

凡ての植物の生理作用が、温度の強い影響の下に行われていることは殊更いうまでもないところである。従つて今まで植物の生理現象と温度との関係については数多くの研究がなされて來ているが、それらは主として環境因子の一つとしての外圍温度と植物の生理現象とに關するものであつた。林學に於ける森林立地學や森林植物學に於けるこの方面の幾多の研究もすべてそうした關係を追求したものであつた。しかし植物の生理作用に直接影響を及ぼすのは外圍の温度ではなくて植物體自體の温度である筈である。植物は變温動物と同じく、元來その固有の温度を持たず、従つてその體温は外圍温度（氣温、地温、水温）に強く支配されるけれども、決して外圍温度と同一ではなく、輻射、風等の影響により、又蒸散作用、呼吸作用等の生理作用によつて、外圍温度と可成り異つた温度を示すのが常である。従つて植物の生理現象と温度との關係に就ての研究は、どうしてもその體温との關係に於てなされねばならない。例えば今或森林の間伐をなした場合、それによつて林木或は地床植物の葉温の受ける影響は林内の氣温地温の變化以上に著しく、従つて又その生理状態にも強い影響を受けるであろうことは推察に難くない。熱害や霜害もかゝる見地から觀察されねばならぬであろう。又今まで多くの観測者によつて一定の條件下に於ける葉温と植物の生理作用殊に蒸散作用との間に極めて密接な關係が認められ、Frank M. Eaton (1930) の如きは棉の葉の蒸散量の比較にこの葉温を測定する方法を用い、一方 O. F. Curtis (1936) は、蒸散作用を主として湿度と氣温との關係に於て論じていた過去の植物學教科書の誤を強く指摘している。

植物體温の研究、もつと適切な廣範な意味を持つ言葉を以ていゝかえれば、植物體の熱代謝に關する研究は以上のような意味に於て、今まで少數の植物學者や農學者によつてなされているが、林學の分野に於ては未だその観測は行われていないようである。このことはこの問題が林學者によつて等閑視されて來たことを示すものであるが、少くともマイクロクリマの観測が喧傳される以前に、このことは當然問題となつていなければならぬ性質のものである。

筆者は 2—3 の樹種について昨年その葉温について観測を試みた。この研究はそれ自體決して獨立した性質のものでもなく、又決して完了したものでもないが、こゝにとりあえずその結果の概要を報告しておこうと思う。

こゝにこの研究に關し、何かと御助言、御叱聲を賜つた佐藤、岡崎、柴田各先生、並びに熱電對の作成及びそれによる温度の測定について種々御指導を賜つた京大理學部植物學教室の畠山先生に對し深謝の意を表する。

I 葉温の測定方法

温度測定の理想は被測温體と测温器具との間に何らの熱受授も行われなくして测温し得ることであるが、今の所このような装置は望めない。従つて吾々の測る温度は被測温體の實際の温度ではなくして、それと測定器具の温度との中間的なものである。尙こゝに葉温と稱するものは、正確には葉の表面温度のことである。A. Seybold 及び F. Brambring (1933) もいう如く、それは近似値として最もよく内部温度即ち眞の葉温（その下に於てすべての生理作用が營まれているという意味に於て）を示すが嚴密には一致しない。

測温には熱電對を使用した。熱電對は感温部の容積が小であり、且比熱の小さい金屬線を用いる關係上、その熱容量は極めて小さく、又その温接點の形狀を種々に變じ得るので、敏感なガルバノメーターと併用するときは、よく微小部分の瞬間的な溫度を測定することが出来る。加えてこれに用いる金屬は普通の金屬であつて、入手し易いという經濟的な利便もある。

熱電對による溫度測定の基本的な事項に關しては V. Weizsäcker (1922), Ernst B. H. Wasser (1926), E. Nuernbergk (1932), 大石 (1946) 等の詳細な記載があり、又葉温測定に對するその應用については、A. Seibold 及び F. Brambring (1933), 中野 (1933), 畠山 (1939) 等の有用な研究がある。従つてこゝにはこの方法の詳細には觸れないで、以下簡単に筆者の觀測方法を述べるに止める。

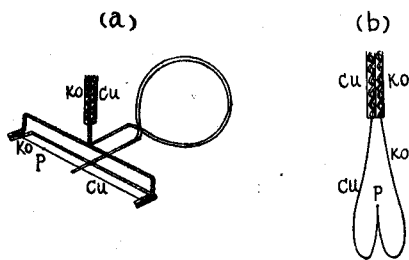
(1) 熱電射の構造

材料としては銅コンスタンタンの組合せを選び、銅については 2.3×10^{-2} cm, コンスタンタンは 2.5×10^{-2} cm の太さのものを用いた。熱電對の全回路の長さを約 10 m とし、使用するガルバノメーターの感度 (2×10^{-7} Amp) を考慮して熱電對の抵抗を 8 オーム前後にするため、銅 5 本、コンスタンタン 12 本とした。これらは感温部を除いては全部絹巻で、互に撚り合わされてエムバイアチューブに通された。

所で熱電對による溫度測定法は前述の如き利點を有するが、反面熱の傳導と輻射による大きな誤差を伴う危險性が大であるから、これを用いての測温に當つてはこの點に充分注意する必要がある。畠山はこれらの誤差を除去することを目的として詳細な實驗を行つた。筆者はこの畠山の實驗結果に基き、更に E. Nuernbergk の記載による Shreve の形を参照し、又野外に於ける實際の測定上の利便を考慮して温接點の形を Fig. 1 のようにした。先づ彈力性の強い鋼線 (0.13 mm) を以て Fig. 1 (a) の如き鉗を作り、それに圖の如く銅 (Cu) 及びコンスタンタン線 (Ko) 各一本を絶縁して巻きつけ、その先端部を銅については 3 cm, コンスタンタンについては 1 cm を裸線として、更に厚さ約 1.0×10^{-2} の箔状に叩き、P 點に於てハンダ付けした。接着部が Cu に長く Ko に短いのは、Cu が Ko に比して熱傳導度が大なるためである。

Fig. 1 (b) は氣温測定用熱電對の温接點の形を示す。

Fig. 1 Shapes of hot-junctions.



冷接點は内徑 0.8 cm, 長さ約 17 cm のガラス管に銅及びコンスタンタン線各一本を絶縁して通しパラフィンで封入し先端でハンダ付けした。ガラス管の上部にはゴム管を通して保護するようにした。尙この冷接點は水を満した魔法ビン中に入れて零度に保つのであるが筆者は葉温と氣温との差を測る場合には、氣温測定用及び葉温測定用温接點を切替スイッチを介して直接連結し、兩者の溫度差を測るようにした。

(2) 熱起電力測定裝置

熱電對によつて溫度を測定するには、その熱起電力或はそれによつて生ずる熱電流を測定しなければならぬが、前者のための裝置としてはポテンシヨメーター、後者のそれとしては精密なガルバノメーターを用いる。ガルバノメーターを用いる方法は操作が簡單で迅速である點で優るが、反面熱電對回路の抵抗の變化によつて誤差を生ずることが考えられる。ポテンシヨメーターによるときは、精密度の點でこれに優るものはないが、操作が稍々複雑で瞬間的な測定を困難ならしめる欠點がある。野外に於ける觀測用としては携帯用指針電流計を用いるのが最も便利である。

筆者は島津製作所製の電位差計式溫度計を併用した。これは小型のポテンシヨメーターと標準

電池、ガルバノメーター及び魔法ペンを組合せて黒色の金屬製ケース (32×24×15 cm) に納め携帯に便したものである。これで 0.1°C の測定は可能であるが、たゞ少し重い欠點がある。

(3) 溫度測定法

測定に先立ち熱電對の起電力と溫度との關係を豫め檢定して圖表を作成しておく。この關係は常溫の範圍でも嚴密には直線的でない。従つて熱電對を用いて任意の溫度差を測定せんとする場合にはこの點に注意を要する。上の圖表はこの場合に便利である。

葉溫は氷點を基準として、或は氣溫との差として測定された。讀度は實驗誤差を考慮に入れてすべて 1/10 度に止めた。葉溫が葉の表側と裏側、更に同じ側でも部分により若干異なることが報告されている。(A. Seybold u. F. Brambring 1933, E. L. Clerg 1932)。この實驗では特にこの點についての觀測は行わなかつたが、測溫にはすべて表側の主脈に沿つた中心部の溫度を測定することにした。

崑山の研究によれば、熱傳導による誤差は溫接點を中心として導線の若干の長さ (溫度差、導線の太さにより異なる) を測溫體に密着せしめ溫度傾度を小にすることによつて消滅せしめることが出來、普通の狀態では前記の長さで充分であるが、輻射の影響はそれを遮斷する以外に方法はないと考えられる。筆者は 15×15 cm の麻布を二枚合せ、これに密に白色エナメルを塗りつけたものを使用した。このようにすれば當然日射下の葉溫は測定し得ないこととなるが、こゝで考えられることは、若し日射下に於いて葉溫の方が熱電對の溫度よりも常に高溫であるならば、輻射の影響は全く考慮する必要がないということである。筆者は葉溫測定用熱電對を用いて、その日射下に於ける空氣中の指度と、それをアラカン (Cyclobalanopsis glauca) 及びクスノキ (Cinnamomum Camphora) の葉に密着せしめたときの指度とを比較したが、この比較に於て後者は前者よりも常に數度高かつた。この事實を以て直ちに上記の假定の證明となすことはもとより出來ないが、恐らくはこの假定は事實ではないかと推測されるのである。筆者は本實驗に於て日射下の葉溫を測定したが、それはこのような證明困難な假定の上に立つていたのであつて、これを葉溫と稱することは或は妥當でないかも知れぬが、それが實際の値と近似するであろうことは期待されてよいと思う。Seybold u. Brambring (1933) もその實驗結果に基いて、照射を受けている熱電對の輻射吸收による溫度上昇は大して攪亂的影響を及さないと考えても誤りではなからうと述べている。

尙筆者の使つた葉溫測定用の溫接點は鋼鐵製の鈎を有しているので、これよりの熱傳導の影響が懸念されるが、この點につき筆者はかゝる鈎を有しない箔狀熱電對 (崑山の記載に倣つて作つたもので傳導の影響からは完全に逸れているものと見做し得る) との比較に於てその懸念のないことを確めた Table 1 はその比較を示す。

Table 1

Comparison between the junction measuring leaf temperature and one which was made according to Hatakeyama's descriptions, and of which we can expect more accurate measurement.

Thermo- couple	Air Temp		Leaf Temp. ob Kuşuno- ki (Cinnamomum Camp- hora)		Leaf Temp. ob Araka- shi (Cyclobalanopsis glauca)	
	Shade °C	In the Sun °C	Shade °C	In the Sun °C	Shade °C	In the Sun °C
Controll	18.3	20.4	21.5	28.6	22.1	29.7
For I. T.	18.4	20.3	21.5	28.8	22.1	29.6

Each value in the table is the mean of 5 observations.

II 實驗結果

實驗は全て京都大學農學部附屬演習林本部構内の苗圃及び溫室に於て行われた。實驗材料とし

てはアラカシ (*Cyclobalanopsis glauca*), ブナノキ (*Fagus Sieboldi*), アブラギリ (*Aleuries cordata*) が選ばれた。アラカシは陽樹であり、又クチクラのよく発達した廣葉を有する點に於て、ブナノキは陰樹である點に於て、又アブラギリは生長の旺盛な點に於て代表的なものとして選ばれたのである。この中アラカシ、ブナノキは共に演習林苗圃にあり、前者は朝の 2~3 時間を除いては全面的に日射を受け得る位置にあり、後者は *Sequoia sempervirens* 及び 2~3 の廣葉樹の樹蔭下にあつて一日中殆ど日射を受けない。樹齡は共に不明であるが、前者は高さ 1.5~2.0 m, 後者は 30~40 cm であつた。アブラギリは温室内の 6 個の 1/20000 のワグナーポットに夫々 1 本宛植えられた 2 年生稚樹であつて、高さ 55~60 cm, 直径 0.45~0.85 cm を有する。

(a) 葉温の一般的経過

葉温が特に気温との關係に於て一般にどのような経過を辿るかを見るために上記 3 樹種について観測を行つた。

(i) アラカシ

1950 年 5 月 7 日 14 時から 8 日 14 時にかけて上記標本木より幼葉, 老葉各 5 枚を選んで 2~3 時間おきにその葉温を観測した。

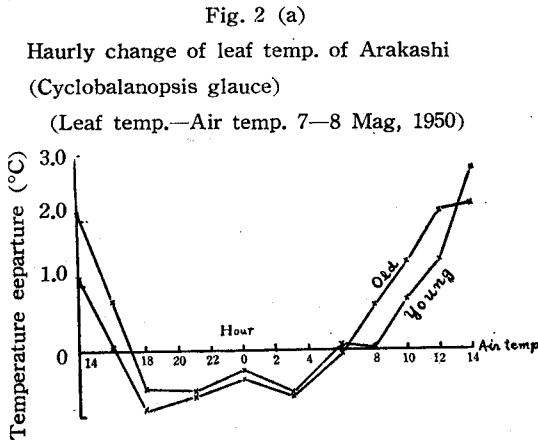


Fig. 2 (a) は日射を遮断した場合のそれらの平均経過を夫々の供試葉から 3~5 cm の距離に於ける気温との差として (葉温—気温), 圖示したものである。又同圖 (b) は観測時の気温及び湿度を示す。全観測時を通じて極めて軽微な雲があつたが風は殆どなかつた。

Table 2 は幼葉と老葉とについて、葉温及び気温の最高, 最低並びに較差及び葉温と気温との差 (葉温—気温) の最大値を示す。葉温の日較差は幼葉よりも老葉の方が大であるように見えるが、統計學的には斷言出來ない。

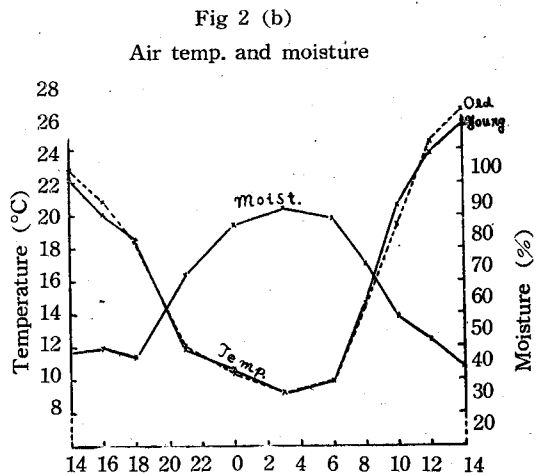


Table 2

The maximum and minimum of the averaged leaf and air temperatures, and the maximum

departure of the leaf temperature from the air.

		The Max. Departure		Leaf Temp.			Air Temp		
		+	-	Max ¹⁾	Min.	Range ²⁾	Max	Min	Range
Young	Temp. (°C)	9.2	0.6	33.0	8.6	24.4	25.6	9.2	16.4
Leaf	Time of Meas.	12	3	12	3	—	14	3	—
Old	Temp (°C)	11.3	0.9	35.8	8.7	27.1	26.5	9.2	17.3
Leaf	Time of Meas.	12	18	12	3	—	14	3	—

1); The leaf temperature in the sun shine.

2): Difference between young and old leaf is not statistically significant at the 5 per cent level.

(ii) ブナノキ

1950年6月27日、前記標本木の同一枝に附着せる葉について先端より5枚を選び、8時より20時まで2時間おきに観測を行つた。測温は常に日射を遮断して行われ、葉温は氣温との差として測定された。氣温及び湿度は葉温測定と同時にアスマン通風乾濕計を用いて測定された。Fig 3 (a) は葉温の平均日變化を氣温との差に於て示し、同圖 (b) は氣温及び湿度を示す。16時の観測に於て湿度が欠測となつてゐるのは乾濕計の故障によるものである。

Fig. 3によればブナノキの葉温は晝間を通じて常に氣温より低く、その推移は湿度の経過と大體に於て一致していることが見られる。

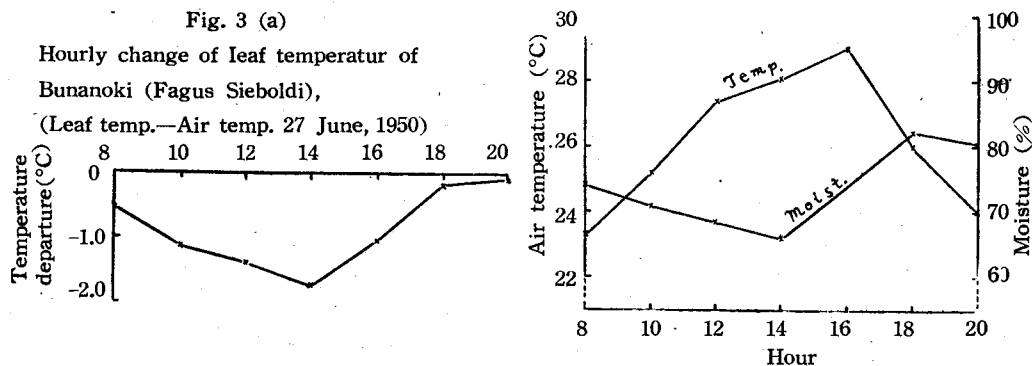


Table 3

Comparison of leaf temperature, shaded and not shaded.

	The averaged leaf temp.		The averaged air temp (°C)	The averaged sun radiation (Cal/cm ² min)
	not shded (°C)	shaded (°C)		
Arakashi (<i>Cyclobalanopsis glauca</i>)	33.58*	26.60	—	0.77
Bunanoki (<i>Fagus Sieboldii</i>)	27.18*	24.50	25.58	0.41
Aburagiri (<i>Aleurites cordata</i>)	31.36*	27.23	27.51	0.60

* significantly greater (at 1 per cent level) than the others.

Each temperature value for Bunanoki is mutually of significant difference.

For Arakashi and Bunanoki, 5 observations, and for Aburagiri 6 observations were averaged

(iii) アブラギリ

1950年6月16日、温室内のポットに植えられた6本の2年生樹について、充分成熟した葉各1枚を選び、6時から20時まで2時間おきに観測された。測温はアラカシ、ブナノキの場合と同様遮光布を用いて日射を完全に遮断してなされたが、たゞ野外と異り温室という特異な環境下の故にガラス壁、コンクリートの床、放熱パイプその他からの熱の輻射が相当大であると考えられるにもかかわらず、これらを完全に遮断することが出来なかつたため、測定値はすべてその影響下にあるものと考えられねばならない。葉温は気温との差として測定され、気温及び湿度はナスマン通風乾濕計を用いて測定された。

Fig 4 (a)

Hourly change of leaf temp. of Aburagiri
(*Aleurites cordata*).

(Leaf temp—Air temp. 16 June, 1950)

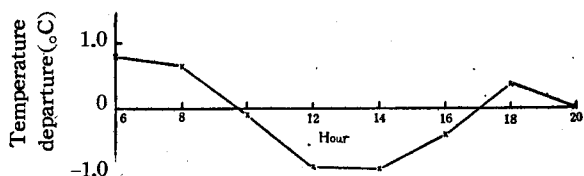


Fig. 4 (b)

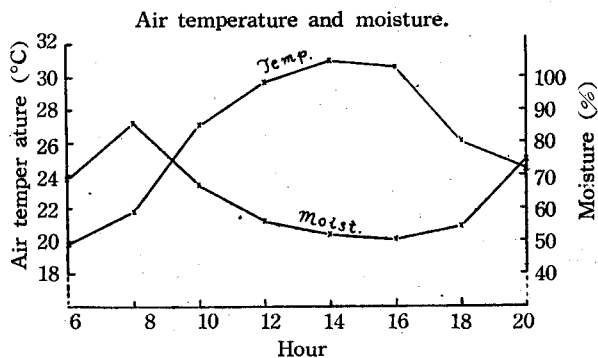


Table 4

Correlation between leaf temp. and transpiration of Bunanoki (*Fagus sieboldi*)

No.	Leaf temp. (l-a) (°C)	Transp. per unit time and weight (mg/g min)	Moisture (%)	Air temp. (°C)
1	-1.4	11.36	60	28.0
2	-1.6	13.16	63	27.0
3	-0.6	8.41	75	26.0
4	-1.1	7.55	69	27.0
5	-0.8	7.86	69	27.0
6	-1.2	9.93	76	27.0
7	-0.5	7.37	82	25.0
8	-0.4	3.47	75	25.0
9	-0.2	4.47	75	25.0
10	-0.7	4.87	75	25.0
11	-0.6	5.99	76	25.0
12	-0.2	0.97	82	23.0
13	-0.1	0.61	89	23.0
14	-0.2	1.16	82	23.0
15	0.0	0.00	86	23.0

Fig. 4はその結果を示す。Fig. 3と同様、葉温の経過は湿度の變化に大體に於て平行していることが見られる。たゞブナノキの場合と異り葉温が気温よりも高い場合が朝及び夕方に見られる。

Correlation coefficient between leaf temp. departure and transpiration $-0.97 \geq r \geq 0.78$
 (Confidence coefficient $1-2\alpha=0.96$).

(b) 葉温と日射との關係

葉温が日射によつて著しく高温となることは多く報告されているが、筆者は前記3樹種を用い、1950年5月下旬から6月中旬にかけて、この關係を見るべく觀測を試みた。太陽輻射はゴルチンスキー日照計を用いて測定された。Table 3 にその結果を示す。

Table 3 に於て日射中に於ける葉温は然らざる場合のそれよりも明らかに高温であつて、敢て統計的檢定を俟つまでもない。又その程度は樹種により、葉の老幼により、輻射エネルギーの大小により著しく變動する。筆者の1觀測では輻射エネルギー $0.80 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ のとき、日射中に於けるアラカシの2年生葉は 34.7°C であつて、日射を遮斷した場合のその葉温よりも 8.3°C の高温を示した。

(c) 葉温と蒸散との關係

蒸散によつて葉温が低下することは當然考えられるが、筆者はこの關係をブナノキの葉を用いて調査した。

(i) ブナノキの葉温低下と蒸散量との相關

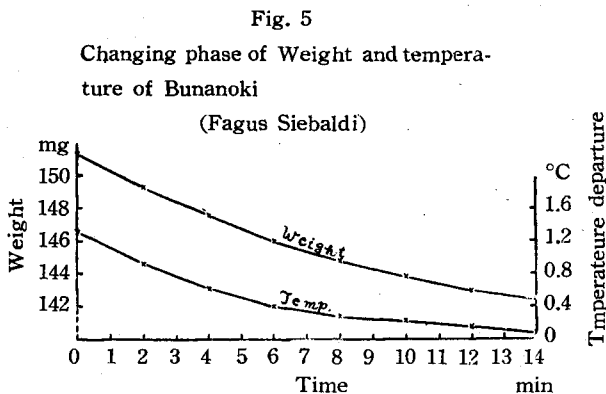
測定は1950年6月30日15時—19時30分に演習林苗圃に於て行われた、(晴、氣温 $23-23^\circ\text{C}$ 湿度 $60-80\%$)。葉温は氣温との差として測定され、氣温並びに湿度の測定はアスマン通風乾濕計を用いて測定された。蒸散量の測定は重量法によりトーションバランスを用いて行われ、生體重量を基準にとつて表示された。蒸散量の表示は普通面積を基準としているようであるが、氣孔の分布、含水量又氣孔の開閉度等は葉によつて一様でなく、従つて面積を用いる方法は必ずしも合理的とはいえない。もとより生體重量を用いる方法が甚だ合理的というわけではないが、少くとも生態學的實驗には大變簡便であつて、しかも面積法に比して劣るとは考えられない。

測定方法は先づ任意に選んだ15枚の葉につき、その葉温を葉が枝に附着したまゝで日射を完全に遮斷して測定し、直にその葉を切りとつてトーションバランスにかけ最初の1分間の重量減少を測定した。この方法によつて求められた蒸散量はもとより正常なそれではないが、Fig. 5 に見る如く重量減少は葉を切り離してから4分間位は略々直線的と見做されるので、この時間内に於ては重量減少量は略々その葉の蒸散量に等しいと見做し得るであろう。こゝでは安全のため最初の1分間の減少量をとつた。

Table 4 はその結果を示す。

それによつてブナノキの葉温低下と蒸散量との間には高い逆相關々係があることが見られる。

(ii) ブナノキの葉の重量變化と温度變化



1950年6月27日13時—15時(薄曇、氣温 $28-29^\circ\text{C}$ 、湿度 $64-80\%$)京大演習林苗圃に於てブナノキの葉の重量及び温度(氣温との差として測定)の時間的經過を測定した。大體同じ古さ同じ大きさの供試葉10枚を選び、その中5枚を側温に他の5枚を重量測定に供した。本來的にはこれらの両者は同一葉であるべきであるが、このような實驗では時間要因が問題となるので止むを得ないこ

とである。葉温、重量共に1枚宛の葉について14分間の變化を1分毎に測定し、その平均値を求めた。Fig 5 はこれによつて畫かれたものであつて、葉温と重量との時間的経過が略々平行していることが分る。

(d) 葉の老幼と葉温

1950年5月19日14時15分(薄曇、軟風、日射弱し)、及び5月24日23時(快晴、軟風)の2回に亘つて測定した結果をTable 5に示す。これによつて明かな如く、アラカシに於ては蔭

Tadle 5.
Comparison of leaf temp. between 1 and 2 year old leaf of Arakashi

	Shaded		Not Shaded		
	Temp. difference (°C) ¹⁾	Leaf temp. of 2 year old leaf (°C)	Temp. difference (°C)	Leaf temp. of 2 year old leaf (°C)	Radiation from the Sun (cal/cm ² min)
Measured at 19 May	—	—	1.84 ²⁾	27.04	—
Measured at 24 May	0.0	26.58	1.74 ³⁾	33.60	0.77

Each value in the table is mean of 5 observations.

- 1) Difference was given as "leaf temp. of 2 year old leaf-leaf temp. of 1 year old leaf"
- 2) ; Statistically significant at 5per cent level.
- 3) ; " at 0.1 "

では葉の年齢による葉温の差は見られないが、日射下に於てはこの差が顯著である。

■ 考 察

H. T. Brown 及び F. Escombe (1905) は、植物の葉のエネルギー代謝に関する詳細な研究を行い次式を立てた。

$$\theta_n - \theta = \frac{Ra - (W + w)}{2e} \dots\dots\dots(1)$$

但し、 θ_n ; 葉温、 θ ; 周囲の気温

R; 葉の受ける太陽の輻射エネルギー (cal/cm² min)

W; 蒸散作用により失われる熱量 (cal/cm² min)

w; 炭素同化作用のために消費される熱量 (cal/cm² min)

a; 葉の吸収係数

c; 葉面の熱放散係数 (thermal emissivity coeff.), 温度差 1°C に於て出入する熱量 (cal/cm² min)

e は次式によつて定められる (Brown 及び W. F. W Ison, 1905):

$$e = \frac{Qh}{(\theta - \theta_n)} \dots\dots\dots(2)$$

但し、Q; 蒸散によつて失われる水の量 (g/cm² min)

h; そのときの気温に於て水の蒸發に要する潜熱 (cal/g)

e の値は樹種により又同一樹種でも個々の葉により、或は葉の状態により、更には風によつて異なるが、Brown 及び Wilson の測定によれば静氣中に於ける正常葉では例えば次のようであつた。

Liriodendron tulipifera (1) 0.01194

(2) 0.01274

Tilia europea 0.01594

(1)式は葉のエネルギー代謝の基本方程式として E. Nuernbergk (1932), A. Seytold, U. F. Brambring (1933)等も引用しているが, B. Huber (1935)はこの Brown-Escombe の式を敷衍して次式を立てた。

$$\theta - \theta_0 = \frac{R \cdot a \cdot \sin \alpha - 2T + A}{2e} \dots \dots \dots (3)$$

但し, θ ; 葉温, θ_0 ; 周囲の気温

R; 葉の受ける輻射エネルギー (cal/cm² min),

a; 葉の吸収係数

α ; 輻射エネルギーの方向に對してなす葉の角度

T; 蒸散作用により失われる熱量 (cal/cm² min)

A; 呼吸作用により生ずる熱量 (cal/cm² min)

e; 葉面の熱放散係数 (Wärmeaustauschkoeffizient) (cal/cm²min).

Huber の式は Brown-Escombe の式と本質的には何ら變りないが, 入射エネルギーの方向に對してなす葉の角度 α を導入し, 炭素同化作用によるエネルギーの費消を無視して, 呼吸作用による熱エネルギーを考慮した點に於て異なる。(3)式に於て蒸散によつて失われる熱量を T とせず 2T とおいたのは, 葉の兩面からの蒸散を考慮したためである。

Brown-Escombe は Helianthus の葉について呼吸熱を 0.000582 cal/cm², その熱放散係数 e = 0.015 cal/cm² min, 従つて呼吸作用による葉の温度上昇 (気温を基準として) を 0.0019 °C と計算した。彼等がそのエネルギー代謝の式に呼吸熱を加えなかつたのはその熱量の小なるにもよるが、同時に又それは彼等の次の如き見解にも基いている。即ち彼等は呼吸作用によつて分解される炭水化物と, それによつて生ずる CO₂ を用いて再び合成される炭水化物の量が若し嚴密に等しいならば, 呼吸作用の影響は全く考慮する必要はなく, 又両者が嚴密に等しくない場合でもその差は極めて少く, そのエネルギー代謝に及ぶ影響は充分無視し得る程に小であると述べている。彼等は同化作用により費消されるエネルギー量の計算に當つて空氣中から吸収される CO₂ の量のみを考慮しているのであるが, 若し呼吸作用によつて生ずる熱量を加えるとすれば, 當然それによる CO₂ の量を空氣中から吸収される CO₂ の量に加えねばならぬことになる。したがつて同化作用と呼吸作用とが平行的に行われている限りに於て彼等の見解は正しい。

これに對して Huber は, 「呼吸作用は同化作用と異つて暗中に於ても行われるから, 妨害的な熱輻射がなく, それが唯一の温度上昇の過程である場合には, それは測定し得る最小限の温度上昇をもたらす。事實蒸散作用の小なる葉は暗中に於て 0.04~0.05 °C の温度上昇を示すが, これは疑もなく呼吸作用によるものである」と述べ, 實際に椿について 0.05 °C の温度上昇を測定している。

呼吸熱は開舒期の葉, 開花しつつある花等に於ては屢々顯著な値を示す (Huber, 崑山 1937) が, 正常葉に於てはその影響は他の因子のそれに比して多くの場合極めて小であることは事實である。けれども葉のエネルギー代謝を理論的に考察せんとするならば, 苟も葉温に關係する全ての因子は當然式中にとり入れらるべきであつて, その影響の小なる故を以て一概にこれを無視してしまふことは正しくない。

Broun 及び Escombe は 1 cm³ (標準壓, 常温) の CO₂ の同化に要するエネルギー量を 5.02 cal と計算し, 1 分間に 1 cm² の葉面より吸収される CO₂ の量を (cm³) で表し, w = 5.02 c とした。これに對し Huber は, 「同化作用も元來エネルギーを費消する生理過程ではあるが, それは光の下に於てのみ行われ, しかも光エネルギーの一部を消費して行われるのであるから, それは決して温度低下を來すようなことはない」と述べている。Huber の言を俟つまでもなく, 植物

は CO₂ の同化に光エネルギーを用いるのであり、熱の形としてエネルギーを消費するのではないから、その限りに於て葉温に直接影響することはない。しかし葉によつて吸収された放射エネルギーの中、如何なる形にもせよその一部が同化作用に用いられるのであるから、その残部が熱エネルギーに轉換されるものとして、同化作用は間接的に葉温に影響を及ぼす。これを考慮に入れないとエネルギー平衡が成立しない。従つて上述の如き方程式によつて葉のエネルギー代謝を説明せんとする限りに於て、Huber の見解は誤である。

葉の受ける放射エネルギーが、放射方向となす葉の角度によつて異なることは當然であつて、Huber がその式の中に照射角度を導入したことは正しい。

Brown 及び Escombe がその取扱を誤り、Huber がそれについて全く考慮しなかつたと考えられるものに葉の外部に對する逆放射がある。O. F. Curtis が指摘している如く、Brown 及び Escombe は傳導及び放射による loss を含めて、放散によつて失われる熱量を γ とおき、

$$\theta_n - \theta = \gamma / 2e$$

とおいた。これは明かに矛盾である。放射ということを考慮するならば天空の或は葉の周圍に離れて存在する物體の温度が葉を包む空氣の温度に等しくない限り上式は成立しないからである。Brown-Wilson の e 決定の方法に徴しても結果として彼等は逆放射による熱の loss を考慮しなかつたと見做さざるを得ない。

筆者の觀測によるアラカシの葉温の日變化 (Fig. 2) に於て夜間の低温は葉から外部に向つての逆放射によるものとしてのみ説明が可能である。大後 (1943) が引用せる所によれば、Briggs 及び Shantz (1916) は夜間の蒸散量は極めて少く、晝間のその 3—5 % に過ぎないという。従つて呼吸作用が夜間に於ける唯一の葉温上昇の過程であるとするならば、逆放射による熱の lossこそは、夜間に於ける唯一の温度低下の原因である。逆放射の影響は稚苗の霜害等についても屢々經驗されるところである。

Curtis は特にこの點に着目して、逆放射殊に赤外線放射による葉の冷却について詳細な實驗を行つた。彼のミカンの葉についての觀測によれば、冬期軽い雲のある日の夕方、樹蔭下にあつてしかも天空からは遮斷されていない葉は 1°C 氣温よりも低かつたが、これをボール板で天空から遮斷するときは、葉温は上昇して氣温と同一温度になつた。自然に於いてのボール板の役目を果すものは雲であると彼は主張する。彼が逆放射による冷却の効果を過大評價している傾向はあるにしても、葉のエネルギー代謝に於けるこの因子の地位は充分考慮されるべきものであろう。

以上論ずる所に従つて葉のエネルギー代謝に關する Brown-Escombe 及び Huber の式を修正すれば、

$$\theta_i - \theta_a = \frac{(R \sin \alpha - \gamma) a + A - (W + w)}{2e} \dots \dots \dots (4)$$

但し、 θ_i : 葉温、 θ_a : 氣温

R; 葉が放射エネルギーの方向に對して直角の位置に於て受ける放射エネルギー (cal/cm² min),

a; 葉の吸収係數、それは又同時に放射能を示す。

γ ; θ_i °C に於ける黒體の放射熱量 (cal/cm² min),

α : 葉が放射エネルギーの方向となす角

A; 呼吸熱 (cal/cm² min)

W: 蒸散によつて失われる熱量 (cal/cm² min),

w: 同化作用により消費されるエネルギー量 (cal/cm² min),

となる。Huber の式の如く、例えば蒸散によつて失われる熱量を T とおくと 2T とおくかは要

するに定義の問題である。

(4)式はエネルギー平衡が達せられた場合に於ける葉温と気温との關係を示す。本式はそれによつて葉温を計算するという事よりも、葉温なるものの本質を理解せしめる點に於てより重大な意義を有する。

(4)式の各因子の中、 α 、 A 、 w 、及び γ については既に述べたが、その他の因子について次に考察を試みよう。

日射により葉温が気温よりも著しく高くなり得ることは Table 3 よりも明かであり、又過去に於けるすべての研究者の指摘している所でもある。太陽常数は $1.942 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ であるが、これが地表面に到達するときは、大氣の吸収によつて著しく減少する。Huber によればヨーロッパの低地では $1.2 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ 以上にはならないという。Broun 及び Escombe は 6 月下旬から 7 月上旬にかけて $0.932 \sim 1.019 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ なる値を報告している。筆者の觀測に於ける最大値は 5 月 24 日 13 時の $0.80 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ であつた。同一の輻射エネルギーを受ける場合にも、葉の熱放散係數、吸収係數、照査角度等によつて葉温の上昇度に大なる差のあることは(4)式よりも明瞭であるが、何れにしても日射下に於ける葉温が気温よりも著しく高くなり得るという事實は大いに注目すべきことであらう。

Broun 及び Escombe によれば吸収係數 a は植物の種類によつて異なるが、同一種類の間では殆ど一定である。葉の年齢による差は殆ど認められないが、古い葉は新しい葉よりも幾分大となる傾向がある。 a の値は大略 0.75 であつて、例えば *Senecio grandifolius* で $0.748 \sim 0.793$ 、*Polygonum Sachalinense* で $0.687 \sim 0.706$ であつた。

蒸散作用が葉温を低下せしめる上に大きな役割を演ずることは云うまでもない。Broun 及び Escombe は $W = 592.6 Q \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ とした。(Q; 蒸散量 $\text{g/cm}^2 \text{ min}$, 592.6; 20°C に於ける水の氣化潜熱、一般に水の氣化潜熱は $0^\circ\text{C} \sim 180^\circ\text{C}$ に於て次式で表される。

$$l_v = 539.1 - 0.6428 (t-100) - 0.000834 (t-100)^2$$

今蒸散量に關する彼等の最大觀測値 (*Polygonum Weyrichii*) $1.291 \text{ g/dm}^2 \text{ hour}$ を例にとれば、

$$Q = 1.291 / (60 \times 100) = 0.000215 \text{ g/cm}^2 \text{ min},$$

従つて $W = 592.6 \times 0.000215 = 0.1274 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$, $e = 0.015$ と假定すれば、約 3.2°C の温度低下を招來することになる。

Eaton 及び Belden は棉の萎凋葉と膨潤状態にある葉との間に平均 5.5°C の温度差を見出しているが、これが蒸散量の差異に基因することは推察に難くない。同様の結果は E. Miller 及び A. R. Saunders (1923), H. H. Clum (1926) 等の報告にも見られる。大後 (1947) によれば稻の葉温は気温より 2°C 以上高くなるようなことは稀で、日射下に於てすら葉温の方が気温よりも低いことがあつた。これは蒸散作用によつて調節される結果と見られる。筆者は 1950 年 6 月 27 日 14 時のバナノキの葉温を觀測した際、或る 1 枚の葉の温度が気温よりも 1.8°C 低いことを見た。

蒸散作用は確かに葉温を低下せしめる重要な因子ではあるが、Lundegårdh (1925) の如く、それを以て過熱に對する植物の一般的な防禦手段であると斷ずることは早計であると思われる。このことは Huber や Curtis も強く指摘している所である。上に引例した $0.000215 \text{ g/cm}^2 \text{ min}$ なる値は、蒸散量としては極めて高い値であると考えられるが、それですら僅かに $0.12 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ の熱量を奪うに過ぎず、 $1 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ に及ぶ太陽の輻射エネルギーには到底及ぶべくもない。このように考えてくれば蒸散作用は過熱に對する一般的な防禦手段としては理解し難いのである。たゞ輻射の弱いときとか或は葉の照射角度が小である場合にのみ両者は平衡を保つて過

ぎない。

(4)式に於て、 W を除く右邊の各因子が一定であるならば、蒸散によつて失われる熱量 W は葉温と氣温との差に正比例する。更に太陽の照射エネルギーを完全に遮斷し、呼吸熱を無視するならば(4)式は

$$\theta_e - \theta_n = \frac{-W}{2e} = \frac{-Qh}{2e} \dots\dots\dots(5)$$

但し、 h ; 水の氣化潜熱

となつて温度差を測定することにより、かゝる状態の下に於ける蒸散量を決定することが出来る筈である。事實 Broun 及び Wilson は

$$Q = \frac{e(\theta - \theta_n)}{h} \dots\dots\dots(6)$$

但し、 θ ; 氣温, θ_n ; 葉温, h ; 水の氣化潜熱。

なる關係によつて蒸散量を決定することを試みた((6)式に於て熱放散係数を $2e$ とせず e としたのは、彼等の葉温測定法それ自體に基く)。又 Frank M. Eaton (1930) は棉の葉の温度低下と蒸散量との間に -0.93 ± 0.025 なる高い相關係数を見出し、蒸散量の比較を葉温と氣温との差を以て行つた。筆者も亦ブナノキの葉について蒸散量と温度低下との間に相關係数 $-0.97 \geq \rho \geq -0.78$ (信頼度=0.95)なる密接な關係があることを見た(Table 4)。Fig 5 に於ける葉温曲線と重量曲線との平行推移も蒸散と葉温との密接な關係を裏づける。

輻射が遮られている場合には、葉の温度低下が蒸散の大きさに關して或る程度の指示を與える可能性のあることは疑うべくもない。しかし(5)式又は(6)式によつて蒸散量を定めんとするならば、先づ何よりも e の値が精密に決定され、且それが少くとも植物の種類によつて一定であることが必要である。又假りに蒸散量の絶對値そのものでなく單にその比較のみを目的とする場合でも、少くとも e の値が一定であるという前提がなければならぬ。Broun 及び Wilson は e の値が風により $0.00017 \text{ cal/meter/min}$ の割合で正比例的に増加することは認めているが、同一種の植物についてはその變動の極めて少いことを期待している。これに對し Huber は e の値は同一の葉に於てすらも時により又部分によつて變動するものであることを認めている。葉温法による蒸散量の測定は葉を切りとらずに、又迅速に瞬間的な値を決定し得るという點に於て重量法に勝るが、そのためには熱放散係數について更に詳細な研究が必要である。

葉の年齢も亦葉温に間接的に影響するものと考えられる。Table 5 によれば、アラカシの葉温は、蔭にあつては1年生葉と2年生葉との間に差は見られないが、日射下にあつては明かに2年生葉の方が高温となる。又2に於てアラカシの葉温の日較差は2年生葉の方が1年生葉よりも大であるといえるようであるが、これは最低温度の差であるよりも、日射下に於ける最高温度の差に基くものであると見做さるべきであろう。このことは恐らく2年生葉が1年生葉に比して吸收係數 a が大きく、蒸散量 W 、熱放散係數 e が小であることに基くのではあるまいか。F. M. Eaton は棉の葉について、極端に若い葉を除き、20日葉から82日葉に至るに従い、葉温と氣温との差は $-4.1 \pm 0.15^\circ\text{C}$ から $-2.3 \pm 0.23^\circ\text{C}$ へと次第に減少し、又 Eaton 及び Belden (1929) は同じく棉の葉について老葉の方が幼葉よりも $-1.3 \pm 0.25^\circ\text{C}$ 蒸散による温度低下の小なることを報告している。

葉のエネルギー代謝にとつて今一つ重大なる因子は風である。(4)式はこの因子を表面的には含んでいないけれども、 e 及び W は風によつて大きく支配される因子であつて、それによつて葉温に重大なる變化を及す。風速が 10 m/min 變化する毎に e が $0.0017 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ 變化するとして、 $e=0.015$ なる値は 44.2 m/min の極めて輕微なる風によつて倍加せられることになる。

以上(4)式の解析によつて葉温なるもの本質を追求したが、現實の葉温はこれらの因子就中太陽輻射、蒸散、風等の時々刻々の變化に應じ、或は又葉體そのものの熱的諸性質によつて大きな變動を示すのが普通である。Eaton 及び Belden は略々同一年齡の同じ程度に光線に露出されている 48 枚の棉の葉を氣温との差として同時的に測定し、 $0.301 \sim 1.280^\circ\text{C}$ なる標準偏差を算出しているが、この値は早朝並びに夕刻に於て最小で日中に於て大となる傾向を示している。それは又極端な場合には平均値の 3 倍強にも及んでいる。この事實は葉温なるものの變動の激しさ、並びにその變動が日中に於て最も激しいものであることを端的に示しているものといえよう。

筆者の行つた乏しい觀測の結果もすべて以上論述せる所に従つて解釋され得る。

Fig 2 に於けるアラカシの葉温の日變化に於て、夜間の低温は葉から外部に向つての逆輻射によるものと見做さるべきである。即ち(4)式に於て、 $R=0$ 、 $W=0$ とおき、更に w おも無視するならば、

$$r_i - \theta_a = \frac{A - a}{2e}$$

を得る。A は r に比して甚だ小であると見做されるから、その結果が第 2 圖夜間の温度経過となつて現われたものである。當夜は全觀測時を通じて軽い雲があつたが、概して好天でしかも供試木は苗圃の中にあつて上空に對して全く遮蔽されていなかつたから、逆輻射による放散熱量は可成り大であつたと推測される。夜間に於ける蒸散量は極めて小であつて、これによつては到底 1°C の温度低下を説明することは出来ない。これに對し晝間の高温は地面よりの輻射エネルギーが蒸散による消失エネルギーを凌駕することに主として基くものであろう。觀測當日の天氣は良好で、この觀測に於ては太陽輻射はゴルチンスキーの日照計に殆ど感じないまでに遮斷せられたとは云うものの、地面からの輻射は遮斷し得なかつた。又アラカシの葉はクチクラ層がよく發達し蒸散量はブナノキ等に比して遙かに少ない。筆者の測定によれば湿度 60% に於てブナノキの 11.35 mg/gmin に對し、アラカシは 5.62 mg/gmin であつた。更にこの高温の原因の一半は、Huber の説の如く硬葉のより大なるエネルギー吸収とより少い熱放散に基くものであろう。同圖に於て老葉は幼葉よりも夜間に於ける温度低下並びに晝間に於ける温度上昇が大であるが、前者は既に述べた如く老葉のより大なる吸収係數並びにより小なる熱放散係數に、又後者はそれらの二つに加うるに幼葉のより大なる蒸散量に歸せしむべきである。

Fig. 2 はすべて太陽輻射を遮斷して行われた觀測結果を示すが、日射下に於けるアラカシの葉温については Table 2 及び Table 3 に示した所である。表の數値はすべて平均値であるが、日射下に於けるアラカシの葉温の最高は 5 月 8 日 12 時、その老葉について觀測され、氣温 24.4°C に對し實に 37.9°C にも達した。

Fig. 3 はブナノキの葉温と氣温との關係を示す。供試木は演習林苗圃の樹蔭下にあり、太陽光線の射入は晝間時を通じて極めて弱く、しかも觀測に際しては日覆を以て上空から遮斷したから、この場合に於ては輻射エネルギー R は完全に 0 と見做される。従つて r 、 A 及び w を無視するならば、第一近似として

$$\theta_i - \theta_a = \frac{-W}{2e}$$

なる關係が成立する。Fig. 2 は本式に従つて解釋され得、又そうさるべきものである。このことは葉温曲線と湿度曲線とが殆ど平行していることよりしても容易に首肯し得る。

Table 4 並びに Fig. 5 は上式によつて示される關係を強固に裏づけるものとして既に引用された所である。

Fig. 4 は温室内のアラブギリの葉温の日變化を示すが、これは葉温の一般経過を最もよく表

している一例と見ることが出来る。即ち早朝に於ては蒸散作用は未だ活潑ではなく、これに反して漸く上り初めた太陽と共に温室内のガラス壁、その他からの輻射が遮断されたとはいえ、若干の影響を及して葉温は気温よりも稍々高いが、蒸散の活潑化に伴つて葉温は次第に低くなり、12~14時に於て最低値を示し、日没と共にこの差は消失する。

以上述べた如く葉温は種々の気象因子の影響の下に實に千差萬別の變化を示し、又時間的にもその變動は甚だしく到底気温と同日の談ではない。

吾々は植物の生理生態的研究に當つてかゝる葉温の特異性を充分認識し、温度條件と云えば單に気温とか土壤温度のみしか考えなかつた過去の誤つた態度を一擲しなければならないと思う。

要 約

植物の葉温は、その下に於て炭素同化作用、蒸散作用、呼吸作用等の重要な生理作用が営まれているという意味に於て、植物の生育上大なる意義を有しているにもかかわらず、今まで餘り注意されていながつた。殊に林學の分野に於てそうであつた。

筆者は葉温なるものが果して今までの多くの研究者が想像していたように気温と同一の経過を辿るものであるか否か、若しそうでないとなれば如何なる推移を示すものであるかを確かめるためにこの研究を行つた。

観測は京大農學部附屬演習林の苗圃に植えられたアラカン、ブナノキ並びに温室内のポットに植えられたアブラギリについて1950年5月7日に行われた。測温には銅コンスタンタン熱電對を用い、その温接點の形を Fig. 1 のようにした。葉温は水點を基準として、或は気温との差として測定された。

観測の結果は Table 2~5 及び Fig. 2~5 に示されている。Table 2 及び 3 は葉温と日射との關係を示し、Table 4 及び Fig. 5 は葉温と蒸散との密接な關係を示すものとして特に重要である。Fig. 2~4 は上記3樹種の葉温の推移の一例を示す。

これらの観測結果を理解するためにも、又葉温なるものの本質を究明するためにも、葉に於けるエネルギー代謝について理論的見地から考察することが必要である。

この點については既に H. T. Broun 及び F. Escombe (1905), Broun 及び W. F. Wilson (1905), B. Huber (1935) 等の有用な研究があるが、彼等の立てた式は、逆輻射によつて放散される熱量の取扱を誤り、或は全く考慮しなかつたと考えられる點に於て欠陥を有する。

筆者は彼等の式を修正して次式を立てた。

$$\theta_i - \theta_a = \frac{(R \sin \alpha - r) a + A - (W + w)}{2e}$$

こゝに、

θ_i ; 葉温, θ_a ; 気温,

R; 葉が輻射エネルギーの方向に對して直角の位置において受ける輻射エネルギー (cal/cm² min)

r; θ_i °C に於ける黒體の輻射熱量 (cal/cm² min)

a; 葉の吸収係數, それは又同時に輻射能を示す。

α ; 葉が輻射エネルギーの方向となす角

A; 呼吸熱 ((cal/cm² min),

W; 蒸散によつて失われる熱量 (cal/cm² min),

w; 同化作用に消費されるエネルギー量 (cal/cm² min)

e; 熱放散係數, 温度差 1°C に於て單位面積から單位時間に放散される熱量 (cal/cm² min)

上式によれば葉温は輻射により、呼吸、同化蒸散等の生理作用により、又葉體の熱的諸性質によつて支配され、必ずしも氣温と同一でないことが明かである。葉の熱的諸性質を示す a , e の値については未だ研究が進んでいないが、植物の種類により、又各葉の状態によつて可成りの變動が豫想されるのであつて、このことは上式による葉温の推定をより困難ならしめる。しかしそれによつて、葉温なるものの本質を明かならしめるという上式の意義は些かも減少するものではない。

葉温は氣温よりも遙かに激しい變化を示すが、それは主として太陽輻射、風、及び蒸散作用に基く、風は熱放散係數 e 並びに蒸散によつて失われる熱量 W を通じて間接的に葉温に影響を及ぼす。

蒸散量の測定に、迅速簡單なることと自然状態のままの葉に對しても適用し得るという利點によつて屢々葉温法が用いられているが、それは熱放散係數 e 及び吸收係數 a が少くとも植物の種類により一定で、且その値が精密に測定せられていない限り一般的に應用し得ないものである。たゞ蒸散量の絶對量を知る目的でなく單にその比較のみを目的とする場合には氣温との差として示された葉温は蒸散の或る程度の指針とはなり得るであらう。

吾々は植物の生理生態的研究に於て、葉温なるものが氣温とは著しく異つた推移を示すものであるということを深く認識しなければならぬ。以上

Literature cited.

1. Broun, H. T. & F. Escombe; Researches on some of the physiological processes of green leaves. Proc. Roy. Soc. Lond., Vol. 76 B, 29-111. 1905.
2. Brown, H. T. & W. F. Wilson; On the thermal emissivity of a green leaf in still and moving air. Proc. Roy. Soc. Lond., Vol. 76 B, 122-137. 1905.
3. Clerg, E. L.; Leaf temperature of lettuce and its relation to tipburn, *Phytopathology*, 32, 815-857. 1932.
4. Clum, H. H.; The effect of transpiration and environmental factors on leaf temperature. *Amer. Jour Bot.*, 13, 217-230. 1926.
5. Curtis, O. F.; Leaf temperatures and the cooling of leaves by radiation. *Amer. Jour. Bot.*, 23, 7-10. 1936.
6. Eaton, F. M.; Cell-sap concentration and transpiration as related to age and development of cotton leaves. *Jour. Agr. Res.*, 40, 791-803. 1930.
7. Eaton, F. M. & G. O. Belden; Leaf temperatures of cotton and their relation to transpiration, varietal differences, and yields. U. S. Dept. Agr. Tech. Bull., No. 91, 1-39. 1929.
8. Greathouse, G. A.; Effects of the physical environment of the physico-chemical properties of plant saps, and the relation of these properties to leaf temperature. *Plant Physiol.*, 7, 349-390. 1932.
9. Huber, B.; *Der Wärme-haushalt der Pflanzen*. 1935.
10. Lundegårdh, H.; *Klima und Boden in ihrer Wirkung auf das Pflanzenleben*. 1925.
11. Miller, E. & A. R. Saunders; Some observation on the temperature of the leaves of crop plants. *Jour. Agr. Res.*, 26, 15-43. 1923.
12. Nuernbergk, E.; *Physikalische Methoden der pflanzlichen Lichtphysiologie*. Abderhaldens Handb. d. biol. Arbeitsm. Abt. XI. Teil 4, Heft 5. 1932.
13. Seybold, A. u. F. Brambring; Ueber die termischen Eigenschaften der Laubbätter. I. *Planta*, Bd. 20, S. 201-229. 1933.
14. Waser, Ernst B. H.; *Temperaturmessung mit Thermoelementen*. Abderhaldens Handb. d.

- biol., Arbeitsm. Abt. V. Teil 1, Heft 3. 1926.
15. Weizsäcker, V.; Untersuchung der Zuckungswärme mit thermoelktrischen Methoden. Abderhaldens Handb. d. biol. Arbeitsm. Abt. V. Teil 1, Heft 3. 1926.
 16. 畠山伊佐男; 野外に於ける熱電對による溫度測定に就て. 植物及動物, 第7卷, 1359-1546. 1939.
 17. 畠山伊佐男; 蓮の花の溫度に就いての觀測. 植物及動物, 第5卷, 463-468. 1937.
 18. 中野 治房; 植物生理及び生態學實驗法. 1933.
 19. 大石 二郎; 溫度及びその測定法. 1946.
 20. 大後 美保; 植物生理氣象學. 1943.
 21. " ; 農地微氣象の研究. 1948.