

植物組織における熱伝導の測定法について

宮里 満・植木健至*・佐々木 修*

(農業物理学研究室・*作物学研究室)

昭和57年8月10日 受理

On the Method of Measuring Heat Conduction in Plant Body

Mitsuru MIYAZATO, Kenji UEKI and Osamu SASAKI

(Laboratory of Agricultural Physics, *Laboratory of Crop Science)

緒 言

外界温度の変化に対応する植物の反応には、しばしば時間的なずれ、いわゆる time-lag がみられる^{3,4,5)}。また、同一作物でも生育段階あるいは品種によって温度反応の様相もまた異なることも周知の事実である。したがって、植物の温度反応を考える上で、組織自身のもつ外界温度の組織内部への伝達能力に対する理解が必要であることが痛感されてきた。このような観点から、本研究は小型センサを改良して組織片に接着し、熱流計の利用により熱伝導度の測定を試みた。測定試料として水分含量の高い多肉質のアロエの葉組織に着目し、組織の厚さ、および空げきの大小と熱伝導との関係をみたものである。本装置は部分的には未だ改良の余地を残しているが、芋類、果実類への応用は将来十分に期待しうるものと判断されるのでここに報告する。

熱伝導率測定装置

1. 測定原理

一般に物体内に熱の流れがあるとき、その温度分布は3次元の場合として存在する。しかし、熱伝導による個体内部の熱の伝わる量を数式的に取り扱うには、Fig. 1 に示すように1次元の場合で定常熱伝導として考えると、フーリエの法則から²⁾

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad \text{Kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

として表わされる。ここで、 Q は熱流密度 (kcal/m²·h)、 λ は熱伝導率 (kcal/m·h·°C) である。

定常状態においては試料の厚さを X (m)、試料の

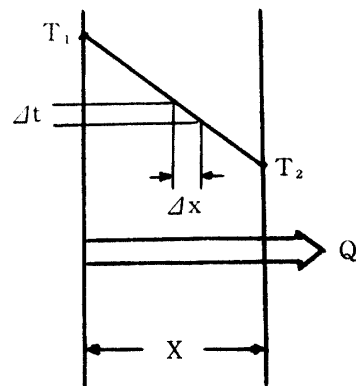


Fig. 1. A heat conduction system.

表面温度を T_1, T_2 とすると、熱伝導率 λ は、

$$\lambda = \frac{Q \cdot X}{T_1 - T_2}$$

で表わされる。すなわち、 Q, T_1, T_2, X を測定すれば λ を求めることができる。

2. 測定装置

熱伝導率の測定にあたって、周囲の急激な温度の変化をできるだけ少なくするために、Fig. 2 に示すように、トタン板で、1辺が90 cmの直方体の箱を作り、外気との空気の移動を断し、その中で測定した。また、吸熱側と放熱側との熱の干渉を極力防ぐために、中央部に同じく熱仕切板を入れた。熱仕切板の中央部に11×6 cmの開口部を設け、この位置に測定用の試料容器を置いて測定した。

測定用容器は均熱用としては厚さ1 mmのアルミ板を用い、アルミ板の上に側方の熱流を考慮して、厚さ3 mmの亚克力板で縦30 mm、横20 mm、で囲んで作った。高さは、3, 5, 9, 12 mmの4種類とした。この亚克力板を接着したアルミ板側を下方にして放熱側とした。一方、亚克力板の上方に接してアルミ板

本報告は昭和54年度科学研究費 (No. 456014) の助成により行った。

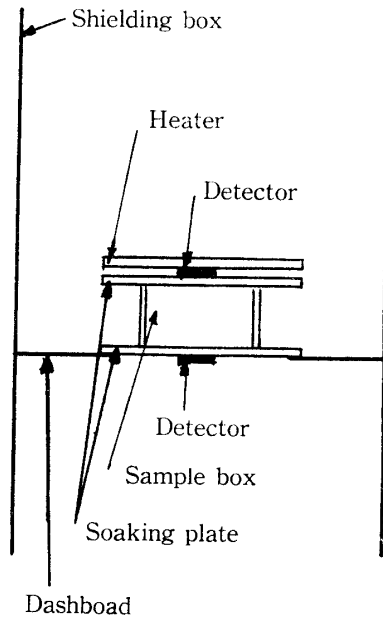


Fig. 2. Schematic diagram of the measuring apparatus.

を置き吸熱側とした。さらに、吸熱、放熱両方のアルミ板上に熱流検出用センサを接着した。吸熱側にはさらにその上に加熱用ヒータを置いてふたと兼用した。

熱流計は昭和電工 K.K 製, shotherm HFM 熱流計 MR 型を、センサには小型面取付用の EM 型を特別に改造したものを用いた。なお熱流計およびセンサの主な仕様は次のとおりである。

1. 測定方法；熱抵抗板温度差検出方式
2. 熱流密度測定範囲； $0 \sim \pm 100,000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$, デジタル表示
3. 測定温度範囲； $-50 \sim 1,000^\circ \text{C}$, デジタル表示
4. 計器精度； $100 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ 以上： \pm （指示値の1%）以内， $20 \sim 100 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ ： \pm （指示値の

2%）以内， $20 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ 以下： $0.4 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$

以内，温度 $-50 \sim 200^\circ \text{C}$ ： $\pm 2^\circ \text{C}$ 以内

5. 再現性： \pm （指示値の2%）以内

6. 入力インピーダンス； $100 \text{ k}\Omega$ 以上

7. センサ熱流範囲： $10 \sim 3,000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$

その他記録用として横河電機製作所製3052型2ペンレコーダを使用した。

測定材料および方法

熱流量の測定にあせっては、Fig. 2 に示したようにしゃへい箱の中にセットした測定箱上のヒータで一定熱量で加熱し、所定時間経過後、センサの熱流指示値が安定した時点で吸熱側センサの熱流量 $Q_1 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ および温度 $T_1^\circ \text{C}$ を読みとる。ついで放熱側センサに切換えて同じく熱流量 $Q_2 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ および温度 T_2 を読みとる。読みとったそれぞれの値から

$$\lambda = K \cdot \frac{Q_2 + Q_1}{2} \cdot \frac{X}{T_1 - T_2}$$

で熱伝導率を求めることができる（ K は補正係数， X は試料の厚さ）。しかし本研究は熱伝導率の絶対値を求めるのが目的ではなく、作物の品種および組織の違いによる熱伝導率の変化がわかればよいので、別に補正係数は求めなかった。

本実験では、いずれも10反復を原則とし、同一区内では吸熱側、すなわちヒータ側の熱伝導度＝（熱流量 Q_1 ）／（温度差 $T_1 - T_2$ ）と放熱側の熱伝導度＝（熱流量 Q_2 ）／（温度差 $T_1 - T_2$ ）について95%信頼区間で検定を行い、有意差の認められたものは省いた。

供試材料として、多肉質の組織をもつアロエ（*Aloe arborescens* Mill）を使用した。

第1実験；植物組織の熱伝熱に及ぼす空げきの影響をみるために、Fig. 3 にみるような処理を行った。健

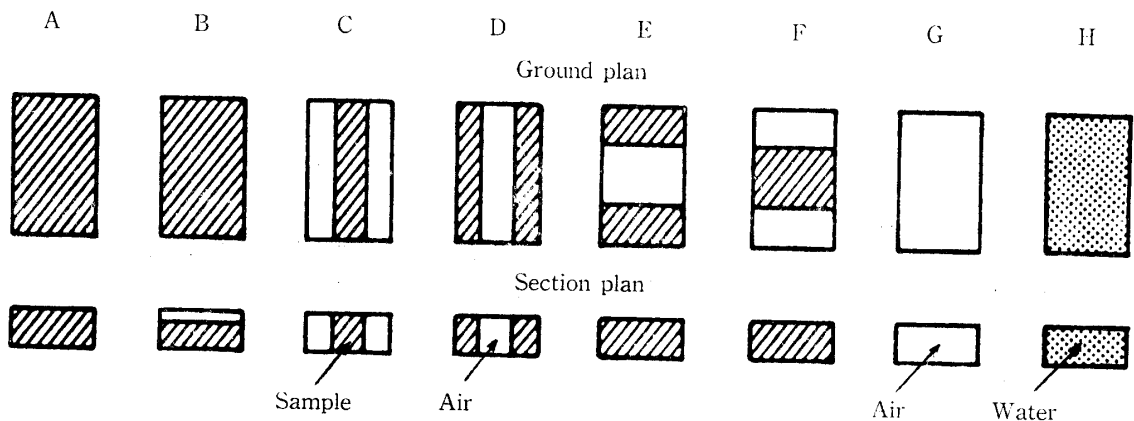


Fig. 3. Schematic presentation of the arrangement of samples in the vessel.

全な葉部を切断し、表皮を取り除いた葉肉部分でブロックをつくり測定容器につめた。放熱側と吸熱側の熱流量と温度は、これらが安定したと思われる約120分後に測定した。その直後に直示天秤により生体重を測定し、メスシリンダーを用いて容積を測定した。測定後、シャーレ上に試料をおき、85°C、24時間の乾燥を行って乾物重を算出した。

処理条件としては、まず縦 30 mm、横 20 mm、高さ 5 mm の測定容器を用い Fig. 3 の平面図および断面図に示すように試料の詰めかたを種々に変えて測定した。すなわち、A 区は測定用容器全体に試料をつめた。B 区は測定用容器の上部に 2 mm 程度の空けきができるようにした。C 区は幅が 14 mm の試料を中央部に置き両側方、縦方向に空けきをつくった。D 区は幅が 7 mm の試料を両側方に置き中央部、縦方向に空けきをつくった。E 区は D 区と同様であるが、中央部横方向に空けきができるようにした。F 区は幅 20 mm の試料を中央部におき、両側方、横方向に空けきをつくった。G 区は測定容器内には試料を充填せず空けきのみとした。H 区は測定容器に水を充滿した。

第 2 実験；測定用容器全体に試料を詰め、測定用容器の高さを 3, 5, 9, 12 mm の 4 とおりについて測定した。

測定結果および考察

第 1 実験；Fig. 3 に示した区、A～H の各測定結果は Table 1. のとおりである。

吸熱側の熱流量 Q_1 は本来一定でなければならないが、B, G の 2 区すなわち、吸熱側と放熱側の間に空けきをもつ区は他区のいずれより明らかに低かった。ヒータの発熱量が一定であることは疑えないので空気という熱抵抗の非常に大きな層が熱流路をしゃ断したため、熱流量が小さくなり、この差が生じたものと考えられる。その他の区間では有意水準 5 % で差が認められなかった。 $(\text{熱流量})/(\text{温度差 } T_1 - T_2)$ すなわち吸熱側の熱伝導度は、B, G の 2 区が他区の何れより明らかに低かった。これは、空気の熱伝導率が植物の熱伝導率に比して極端に低いことによるものと思われる。

B, G 両区を除く他の処理区間では、有意水準 1 % で全く差は認められなかった。以上の結果から、本実験装置を用いる場合、測定用容器内に多少の空けきが存在しても、上面と下面 (Fig. 1 における吸熱面と放熱面) がつながっていれば熱流量に影響はないと考えられる。また、対照区として測定した空気の測定値から算出した熱伝導率は、 $5.0 \times 10^{-5} \text{ (cal/cm} \cdot \text{°C} \cdot \text{s)}$ で、

空気の熱伝導率^{1, 2)} $5.8 \times 10^{-5} \text{ (cal/cm} \cdot \text{°C} \cdot \text{s)}$ とほぼ一致することから、この測定方法で十分な測定値が得られると考えられる。しかし、水の場合は、蒸発などの問題があり期待した値は得られず今後追試したい。

第 2 実験；測定用容器の厚さを変化させた各区の測定結果は、Table 2. のとおりである。

吸熱側の熱流量 Q_1 は有意差が全くみられず実験条件としては良好であった。 $(\text{熱流量})/(\text{温度差 } T_1 - T_2)$ すなわち熱伝導度は試料 (組織) の厚さが増加するにつれて大となることが明らかである。しかし、高さ 5 mm に補正した値で検討してみると、高さ 3 mm 区のみが他の 3 区に対しすべて有意に小であることが認められた。これは、3 mm の測定用容器の場合、わずかの空けきが試料の占有率を大きく低下させ、空気の影響により熱伝導率が低下したと考えられる。したがって、測定用容器の高さが 5 mm 以上であれば、十分な精度の測定ができると考えられる。以上の結果として、アロエ生体組織では厚さの変化に応じ、熱抵抗が正比例することが確認できた。

前述のように、植物組織に対する熱伝導率測定の実みは前例がないだけに、本装置の利用に関しては未知の部分も多い。したがって最後に、今後改良すべきと思われるいくつかの事項を列挙すると次のとおりである。

(1) 熱流計の温度指示は、最高感度が 0.1 °C 以上の高感度の機器の改良が望まれる。

(2) 本測定では急激な温度変化や空気の流動を避けるため、トタン板を用い吸熱側と放熱側をしゃ断し、かつ室温の変化の少ない冬季に行ったが、それでも多少の測定誤差は免れ得なかった。したがって今後は定温器の改良利用などにより、センサの上下面の温度環境を常に一定に保持しうような工夫が必要である。

(3) 熱流測定部位からの熱の側方への流出入をさけるために、さらに超小型のセンサの開発が望まれるし、試料を入れる容器の外界との断熱についても一層の改良が必要である。

(4) 本装置は芋類、果実類などの多肉質組織の熱伝導率測定には好適であるが、作物別あるいは組織別に水分含量や空けき量も異なるので、それらに対応した容器の大きさを決めるべきである。とくに本実験でも明らかのように、吸熱側と放熱側との距離、すなわち試料の厚さについてはさらに検討が必要である。

要 約

植物の生長が外温によって支配を受けることは周知

Table 1. Thermal conductivities of aloe (No. 1)

Treatment	The number of data	Thermal flux		Temperature		Difference of temperature (°C)
		Q ₁	Q ₂	T ₁	T ₂	
		(kcal/m ² ·h)		(°C)		
A	19	89.3	30.3	27.3	22.0	5.3
		13.07	1.82	0.75	0.88	0.58
B	18	80.6	27.7	29.3	23.4	5.9
		11.54	1.71	0.84	0.92	0.24
C	9	92.1	30.0	29.0	23.9	5.1
		10.46	1.30	0	0.33	0.33
D	10	93.2	28.8	29.1	23.7	5.4
		8.59	1.64	0.57	0.48	0.52
E	9	93.6	29.5	29.0	23.8	5.2
		13.67	2.28	0.50	0.67	0.44
F	9	91.3	27.8	30.2	25.0	5.2
		8.79	3.31	0.44	0.71	0.67
G (Air)	9	78.2	20.9	30.8	25.0	5.8
		8.38	0.55	0.44	0	0.44
H (Water)	9	95.4	26.6	30.7	25.9	4.8
		12.06	1.83	0.50	0.78	0.67

Each value is expressed as mean (upper) and standard error (lower).

Table 2. Thermal conductivities of aloe (No. 2)

Thickness (mm)	The number of data	Thermal flux		Temperature		Difference of temperature (°C)
		Q ₁	Q ₂	T ₁	T ₂	
		(kcal/m ² ·h)		(°C)		
3	9	85.8	24.8	30.0	26.0	4.0
		11.61	1.99	0.50	0.50	0
5	19	89.3	30.3	27.3	22.0	5.3
		13.07	1.82	0.75	0.88	0.58
9	10	83.4	17.8	31.3	25.8	5.5
		10.52	1.63	1.06	0.79	0.53
12	10	80.2	16.3	33.3	26.8	6.5
		13.81	1.81	0.82	0.79	0.53

Calculated in proportion to 5 mm as standard.

3	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—
12	—	—	—	—	—	—

Each value is expressed as mean (upper) and standard error (lower).

$\frac{Q_1}{T_1 - T_2}$ (kcal/m ² °C·h)	$\frac{Q_2}{T_1 - T_2}$	Fresh weight (g)	Dry weight (g)	Water content (%)	Volume of sample (cm ³)	Specific gravity (g/cm ³)
17.01	5.78	2.57	0.030	98.8	2.65	0.97
3.09	0.82	0.23	0.008	0.29	0.28	0.04
13.57	4.67	1.63	0.020	98.8	1.69	0.97
1.92	0.39	0.26	0.003	0.20	0.26	0.05
18.01	5.89	1.85	0.019	99.0	1.96	0.95
1.47	0.37	0.17	0.003	0.18	0.20	0.04
17.42	5.37	1.66	0.013	99.2	1.75	0.95
2.29	0.46	0.14	0.005	0.27	0.14	0.05
17.99	5.68	1.73	0.018	99.0	1.80	0.96
2.63	0.55	0.19	0.004	0.27	0.20	0.05
17.66	5.40	1.74	0.018	99.0	1.78	0.98
2.14	0.91	0.33	0.007	0.23	0.32	0.06
13.59	3.64	—	—	—	—	—
1.55	0.39	—	—	—	—	—
20.25	5.68	—	—	—	—	—
3.37	1.05	—	—	—	—	—

$\frac{Q_1}{T_1 - T_2}$ (kcal/m ² °C·h)	$\frac{Q_2}{T_1 - T_2}$	Fresh weight (g)	Dry weight (g)	Water content (%)	Volume of sample (cm ³)	Specific gravity (g/cm ³)
21.45	6.21	1.52	0.016	99.0	1.53	0.58
2.90	0.50	0.18	0.005	0.30	0.14	0.08
17.01	5.78	2.57	0.030	98.8	2.65	0.88
3.09	0.82	0.23	0.008	0.29	0.28	0.09
15.28	3.27	5.27	0.045	99.1	5.29	0.98
2.32	0.43	0.16	0.005	0.12	0.13	0.07
12.37	2.52	6.92	0.061	99.1	6.94	0.96
2.01	0.37	0.24	0.008	0.12	0.25	0.03

—	3.73	2.53	0.027	—	2.55	—
—	0.30	0.30	0.008	—	0.23	—
—	5.78	2.57	0.030	—	2.55	—
—	0.82	0.23	0.008	—	0.28	—
—	5.89	2.93	0.025	—	2.94	—
—	0.77	0.09	0.003	—	0.07	—
—	6.05	2.88	0.025	—	2.89	—
—	0.89	0.10	0.003	—	0.10	—

の事実である。しかし、外温の変化が組織内部にどのように伝達されるかについては全く未知の分野である。

このような観点から、本実験は EM 型センサと Shotherm HFM-MR 型熱流指示計との組合せにより、植物組織の熱伝導率測定を試みたものである。測定材料としてアロエの葉肉組織を用いた。

測定結果から、供試材料（組織）の厚さの増加に比例して熱流量は減少すること、また測定容器内の空気が増加するほど急激に熱流量が減少することが認められた。

本測定装置は未だ改良すべき点も多いが、今後芋類、果実類など多肉質組織の熱伝導率の測定に充分適用しうるものと考えた。

謝辞 本実験は本学学生、梅崎輝尚君の助力をえた、記して謝意を表する。

文 献

- 1) Eckert, E. R. G. and Drake, R. M., JR.: Analysis of heat and mass transfer. 32. McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo (1972)
- 2) 一色尚次・北山直方：伝熱工学. 8-10 森北出版社, 東京 (1975)
- 3) 宮里 満・植木健至：作物葉生長自動測定装置及び水温制御装置の試作. 鹿大農学術報告, **No. 27**, 199-205 (1977)
- 4) 二ノ兼武・宮里 満：歪計による樹幹直径の日変化測定. 鹿大農学術報告, **No. 8**, 76-88 (1959)
- 5) 植木健至・宮里 満：植生長測定に対する電気抵抗線歪計の応用. 日作九州支報, **No. 24**, 23-30 (1965)

Summary

Needless to say plant growth is influenced by the surrounding temperature, however, little has been known on the process of heat conduction from the surrounding environment into the living plant body.

In this experiment, as the first step, the thermal conductivity was measured by using the mesophyll block of aloe (*Aloe asborescens* Mill) as an experimental material. Measuring apparatus originally constructed for this experiment consisted of a detector (EM type) and indicator (Shotherm HFM-MR type) of the thermal flux (Fig. 2).

The results showed that the thermal conductivity of aloe came to be decreased in proportion to the increasing rate of block thickness. While, the thermal conductivity got abruptly decreased on the occasion when the air-space-layer was located over the block, owing to high resistance of the air.

The methods may be applicable for measurement of heat conductivity of tubers, fruits and the other organs, although there are a few points to be improved.