



Title	赤外放射温度計による群落表面温度に関する研究
Author(s)	王, 秀峰
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	甲第3448号
Issue Date	1994-03-25
DOI	https://doi.org/10.11501/3076702
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/32776
Type	doctoral thesis
File Information	3448.pdf



此
論
文
獻
給
我
的
導
師

堀
口
郁
夫

博士論文

赤外放射温度計による群落表面温度
に関する研究

王 秀 峰

赤外放射温度計による群落表面温度に関する研究

目 次

第Ⅰ章	概説	2
第1節	研究の背景と目的	2
第2節	研究の概要	3
第Ⅱ章	放射温度計の特性と天空長波放射の補正法	5
第1節	はじめに	5
第2節	放射温度計の測定理論	6
第3節	測定方法	8
3.1	放射温度計の特性に関する室内実験	9
3.2	天空からの長波放射に関する屋外実験	11
第4節	実験結果および考察	13
4.1	放射温度計の特性に関する室内実験	13
4.2	天空からの長波放射に関する屋外実験	20
第5節	まとめ	26
第Ⅲ章	作物群落の窓領域の放射率	31
第1節	はじめに	31
第2節	放射率測定の理論と方法	32
2.1	測定装置	32
2.2	測定理論	33
2.3	測定方法	35
2.4	測定項目	36
第3節	測定結果および考察	38
3.1	黒色板の放射率	38
3.2	土壌の放射率	39
3.3	作物葉の放射率	39
3.4	群落放射率	41

第 4 節	ま と め	45
第Ⅳ章	群落表面温度の特徴	48
第 1 節	はじめに	48
第 2 節	観測方法および解析方法	48
2 . 1	畑の観測方法	48
2 . 2	森林の観測方法	50
2 . 3	解析項目	51
第 3 節	結果および考察	53
3 . 1	測定期間中の畑, 森林の被覆率の推移	53
3 . 2	群落表面温度と気温の日変化	55
3 . 3	最高・最低群落表面温度と最高・最低気温の差	59
3 . 4	作物群落別の最高・最低表面温度の比較	64
3 . 5	群落表面温度の最高・最低値の出現時刻	69
第 4 節	ま と め	72
第Ⅴ章	作物群落の構造と群落表面温度の関係	75
第 1 節	はじめに	75
第 2 節	観測方法および解析方法	75
2 . 1	作物群落の構造	76
2 . 2	群落の構造による群落表面温度の相違	77
第 3 節	観測結果と考察	78
3 . 1	作物群落の構造	78
3 . 2	群落の構造による群落表面温度の相違	81
第 4 節	ま と め	86
第Ⅵ章	群落表面温度と気象要素の関係	89
第 1 節	はじめに	89
第 2 節	解析方法および解析項目	89
2 . 1	解析方法	89
2 . 2	解析項目	90

第 3 節	結果および考察	92
3. 1	全時期のデータの解析	92
3. 2	時期別データの解析	104
3. 3	畑の年別結果の比較	111
第 4 節	まとめ	117
第 VII 章	群落表面温度と植生指数の関係	120
第 1 節	はじめに	120
第 2 節	観測方法および解析方法	121
2. 1	植生指数の定義と観測方法	121
2. 2	被覆率および葉面積指数の測定	122
2. 3	群落表面温度の観測方法および解析項目	122
第 3 節	結果および考察	123
3. 1	植生指数の特徴と被覆率, 葉面積指数の関係	123
3. 2	群落表面温度と植生指数の関係	130
第 4 節	まとめ	134
第 VIII 章	あとがき	137
謝 辞		139
参考文献		141

第 I 章 概 説

第 1 節 研究の背景と目的

森林や作物などの植生層は群落といわれている。この群落の表面は大気との熱や物質の交換に大きく関与する部分で、地域環境や地球環境に大切な働きをする。すなわち群落表面は地上の種々な熱的現象の作用面である。そのため、接地気温、蒸発散、熱の放出などは群落の表面温度によって支配される。群落の表面温度の状態や特性などを知ることは、地上の種々な熱的現象を理解する上で重要である。しかし、群落表面の熱交換に関係するこの表面温度を測定することは困難であった。これは群落表面が単純な平面的な表面でなく、群落内にある植物の天空に向いている多数の植物葉面や土壌面で構成されている表面のためである。

一方従来、表面温度の測定は表面に細い熱電対線やサーミスタを張り付けて行われていた。しかし、この方法は測定表面と温度計の接触が十分に確認されないことや、温度計による表面の熱的状態の攪乱があり、表面温度を正確に測定することは至難のことであった。また、群落表面のように多様な質や複雑な形状で構成されている表面の温度を測定することは、ほとんど不可能であった。

これに対して、物体から発するの長波放射を測定し、これを温度に変換する非接触性の温度計が従来から使用されていたが、精度的に問題があり、主として溶鉱炉や電気炉のような高温な所の測定に限られていた。しかし、技術の進歩にともない、常温(50℃以下)付近を測定する非接触性の温度計(赤外放射温度計、または放射温度計という)が製造され、物体に接触しないで種々の表面温度が測定できるようになった。特に最近は、この赤外放射温度計(以下、単に放射温度計)が安価になり、しかも測定精度も向上したため、種々な目的に使用できるようになった。

しかし、わが国では放射温度計は1980年代から一般に使用される

ようになったため、放射温度計の特性や、これを用いた研究がまだ充分行われているとは限らない。特に、植物群落表面のように従来の測定では不可能であった表面温度については、ほとんど研究が行われていない。

一方、人工衛星が発達し種々な衛星が打ち上げられ、これらの衛星によって、地球上の表面温度が定常的に測定されている。さらに最近のように地球環境が問題になると、この衛星データを使用して多くの地球上の環境の解析が行われるようになった。しかし、この解析に使用する基礎的な表面温度の研究は、ほとんど行われていないため、衛星データ解析に植生上の表面温度の知識の不足が支障になっている。

この研究の目的は、畑と森林の表面温度の特性を明かにして、衛星データの解析に役に立つような、群落の表面温度と種々な熱的現象の基礎的な関係を明らかにすることである。そのため人工衛星で表面温度を測定している放射計と、同じ測定原理の携帯型の放射温度計を使用して研究を行った。研究はまず放射温度計の特性から始め、群落の表面温度の特性、群落の表面温度の応用まで行った。

第2節 研究の概要

放射温度計を使用して群落の表面温度を測定する場合、まず放射温度計の特性を知らなければならない。放射温度計は従来の接触型の温度計と異なり、温度計の指示値が測定物体の真の表面温度ではない。それは測定物体からの長波放射を測定しているため、周囲からの長波放射や測定物体の放射率が指示値に影響するからである。さらに、国産の放射温度計は室内用として開発されたため、周囲からの放射の補正に放射温度計の本体温度を使用して補償している。そのため第Ⅱ章で放射温度計の特性と、屋外で放射温度計を使用する場合の補正法の研究を行った。

さらに、放射温度計に入る測定物体の放射量は、測定物体の放射率によって異なる。しかもこの放射率は放射温度計が感じる窓領域

($8.5 \sim 12.0 \mu m$)の放射率である．この窓領域の放射率について測定した文献は非常に少なく，特に群落表面の放射率の研究文献はほとんどない．そのため第Ⅲ章において，作物群落の窓領域の放射率の研究を行った．

第Ⅳ章では畑と森林について，群落の表面温度の特性の研究を行った．植生上の表面温度を放射温度計で測定すると，これは従来のような平面の表面温度でなく，群落内にある天空を向いている葉の温度や植生がない部分の地面温度の集合で構成される表面温度である（以下，これを群落表面温度と称する）．４種類の畑と森林でこの群落表面温度を測定し，主に気温と群落表面温度の相違について解析した．

放射温度計による群落表面温度は，植物の種類，植物被覆率など多くの要素の影響を受ける．これらの影響を明らかにするために，第Ⅴ章ではダイズ畑とトウモロコシ畑について，群落の構造がどのように群落表面温度に影響するかを調べた．

さらに，第Ⅵ章では群落表面温度がどのような気象要素に支配されるかを回帰分析によって解析した．使用した気象要素は気温，飽差，日射，純放射，湿度，風速であるが，主として気温，飽差，純放射，風速について回帰分析した．これらの解析は作物別，昼・夜別，生育期別，さらに1992年と1993年の違いなどについて行った．

第Ⅶ章は群落表面温度の応用である．群落表面温度と植生指数の回帰係数は種々な熱的現象のパラメータになると考えられる．そのため群落表面温度と植生指数の関係について解析した．まず植生指数の基本的な日変化，被覆率や葉面積指数との関係，さらに季節変化を調べた．その後，群落表面温度と気象要素の関係に，植生指数を加えた場合の関係を解析した．さらに群落表面温度と植生指数の回帰係数，または群落表面温度－気温と植生指数の回帰係数について解析した．

第Ⅷ章はまとめである．

第Ⅱ章 放射温度計の特性と天空長波放射の補正法

第 II 章 放射温度計の特性と 天空長波放射の補正

第 1 節 はじめに

群落表面温度を測定する場合，放射温度計以外で測定することはほとんど不可能である．しかし，最近常温付近を測定する非接触性の携帯型の放射温度計が市販されるようになり，群落表面温度の測定が容易になった．この放射温度計は接触型の温度計と異なり，測定物体からの長波放射を測定して温度変換しているため，周囲からの長波放射や測定物体の放射率などが測定値に影響する．したがって，放射温度計の指示値が測定物体の真の温度ではない．

そのためアメリカでは1960～1970年代に盛んに，放射温度計の特性や補正方法の研究が行われた（たとえば，Lorenz, 1966; Conaway, et. al., 1967b; Fuchs et. al., 1968; Jackson et. al., 1969; Hatfield, 1979）．その後，1980年代に入って日本においても放射温度計が製造されるようになり，安価に入手できるようになった．

国産の放射温度計は，室内で測定する測定器として設計されており，周囲からの放射量や測定物体の放射率の補正機構が付いている．周囲からの放射量の補正は放射温度計内部の温度を使用しているため，屋外で測定する場合，放射温度計内部の温度と周囲からの放射の相当温度は異なり，その差が誤差として導入される．

また，放射率の補正機構が付いているが，測定時に測定物体の放射率の設定が正しく行われない場合が多い．これは放射温度計の波長感度である窓領域の放射率の測定が困難であることと，測定例が少ないためである．したがって，放射率の設定の特性や放射率の設定が正しく行われない場合の誤差を知る必要がある．

国産の放射温度計のこれらの特性や誤差について研究した論文はほとんどない．放射温度計を正しく使用するためにも，これらの放射温度計の特性を明らかにし，測定値の正しい補正方法を検討する

必要がある。

この章では国産の放射温度計の特性と、この特性に基づく誤差を調べて、群落表面温度を測定するための補正法を検討したものである。

第2節 放射温度計の測定理論

放射温度計の特性や誤差を調べるためには、放射温度計の測定理論を知らなければならない。各社の放射温度計の測定機構は異なるが、測定理論はほぼ同じである。

放射温度計の放射センサに入る放射量は、測定表面からの放射量と、測定表面で反射した周囲からの放射量が含まれる。したがって、放射温度計の出力は(Ⅱ.1)式で表わされる。

$$W_0 = \alpha [\varepsilon_0 \cdot R(T) + (1 - \varepsilon_0) \cdot R(T_a)] \quad (\text{Ⅱ.1})$$

ただし、 W_0 ：放射温度計の出力、 α ：変換係数、 $R(T)$ ：温度 T K の測定物体の黒体放射エネルギー(ただし、放射温度計に感じる波長範囲)、 $R(T_a)$ ：周囲からの放射エネルギー(ただし、放射温度計に感じる波長範囲)、 T_a ：周囲からの放射エネルギーに対する相当温度(K)、 ε_0 ：測定物体の放射率(ただし、放射温度計に感じる波長範囲)。

国産の多くの放射温度計は、チョッパやセンサにサーモパイルを使用している。したがって、放射温度計の放射センサには、チョッパからの放射やサーモパイルの基準温度(これらの温度を T_c K)と測定物体からの放射量との差が入る。そのため放射温度計の出力は(Ⅱ.2)式のようなになる。

$$W_0 = \alpha [\varepsilon_0 \cdot R(T) + (1 - \varepsilon_0) \cdot R(T_a) - R(T_c)] \quad (\text{Ⅱ.2})$$

ただし、 $R(T_c)$ ：チョッパからの放射量やサーモパイルの基準温

度による放射量

(Ⅱ.2)式の出力では, $R(T_c)$ が誤差になるため, 別に温度センサで測定したチョッパ温度や放射センサの温度(以下, 本体温度 T_c)による $R(T_c)$ を加えている. この本体温度による補正を, Ma社とO社の放射温度計では放射率補正の後に行っているため, (Ⅱ.2)式は(Ⅱ.3)式になる.

$$W = \alpha \left\{ \varepsilon_o \cdot R(T) + (1 - \varepsilon_o) \cdot R(T_a) - R(T_c) \right\} / \varepsilon' + R(T_c) \quad (\text{Ⅱ.3})$$

ただし, W : 補正後の放射温度計の出力, ε' : 設定放射率.

(Ⅱ.3)式の $\{ \}$ 内は放射センサの出力で, 右辺最終項 $R(T_c)$ は本体温度のための温度センサの出力である. したがって, 設定放射率 $\varepsilon' = 1$ のときは本体温度に影響されない出力になる. 今, 測定物体の放射率と設定放射率が等しいとき($\varepsilon_o = \varepsilon'$), (Ⅱ.3)式は(Ⅱ.4)式になる(久保井ら, 1977).

$$W = \alpha \left[\varepsilon_o \cdot R(T) + (1 - \varepsilon_o) \cdot \{ R(T_a) - R(T_c) \} \right] / \varepsilon_o \quad (\text{Ⅱ.4})$$

(Ⅱ.3)や(Ⅱ.4)式で明らかのように, 放射温度計の出力は, 放射温度計の本体温度の影響を受けることになる. 室内測定の場合で, 壁や天井の温度(T_a)と本体温度(T_c)が近似なら, (Ⅱ.4)式は(Ⅱ.5)式となる.

$$W = \alpha \cdot R(T) \quad (\text{Ⅱ.5})$$

したがって, 室内のように周囲の放射物体(壁や天井)の温度と放射温度計の本体温度が近似の場合で, 放射率設定を正しく行えば正確に表面温度が測定できる.

しかし，屋外で測定する場合は，周囲からの放射の主なものは天空からの長波放射（以下，単に天空からの放射）である．そのため，天空からの長波放射量 $R(T_a)$ （以下，単に放射量）と放射温度計の内部補正量 $R(T_c)$ は大きく異なり，それが誤差となって現れる．

このように，屋外で使用する場合，放射温度計の本体温度と天空からの放射量が，測定表面温度に関係する．さらに，最近の放射温度計は測定物体の放射率を補正する機能も付いている．

そのため放射温度計の本体温度の影響，放射率補正の特性，天空からの放射量の影響と補正法などについて研究を行った．

第3節 測定方法

実験は市販の放射温度計を使用して，室内と屋外で行った．使用した放射温度計は，室内実験については表Ⅱ-1に示す外国製の1社を含む6種類の放射温度計を，屋外実験はA.1放射温度計とB放射温度計を使用した．

表Ⅱ-1 実験に使用した放射温度計の概要

記号	波長範囲 (μm)	温度範囲 ($^{\circ}C$)	精度 ($^{\circ}C$)	視野角 ($^{\circ}$)	センサー	応答速度 (sec)	備考
A.1	8.5~12.5	-50~150	± 0.5	2	PbTiO3	0.7(95%)	Ma. Co. (日本)
A.2	8.5~12.5	-30~150	± 1.5	1	PbTiO3	0.7(95%)	"
B	7~20	-50~500	± 1.0	2	サーミスタ	0.5(90%)	O. Co. (日本)
C.1	8~14	-50~1000	± 0.3	1	焦電素子	0.5~1.0	Mi. Co. (日本)
C.2	7~30	-50~1000	± 1.0	1.3	"	0.5~1.0	"
D	8~14	-30~100	± 0.3	2	?	~0.5	E. Co. (7月加)

これらの実験は主として一定の放射率になるように塗料を塗布した金属製の板（以下，測定板）を使用した．使用した塗料は放射率 0.96 の黒色塗料（3M Velvet Coating 2010-住友スリーエム社製）と放射率 0.03 の銀色塗料（サンデーペイントkk製）で，これらの塗料は波長による放射率の変動が少ないものとして市販されている．なお，黒色塗料の全長波域（2~35 μm ）と近赤外域（1.4~2.5 μm ）の

放射率の差は，ほとんどない（住友スリーエム社の資料）．また，銀色塗料はアルミニウム粉末を主成分としているアルミニウムは $5\mu\text{m}$ 以上で均一な分光放射率をもつ．

測定板の放射率は D and S AERD 放射率計（昭和電工 kk 製）を使用して決定した．しかし，この放射率計は全長波域の放射率を測定するもので，放射温度計は窓領域の放射を測定している．したがって，全長波域の放射率と窓領域の放射率が異なる場合は，放射率を変更する必要がある．しかし，波長による放射率の変動が小さい塗料を使用しているので，全長波域の放射率と窓領域の放射率に大きな差がないと仮定した．測定板は裏面にヒータを貼付け温度制御できるようにした（図 II-1）．

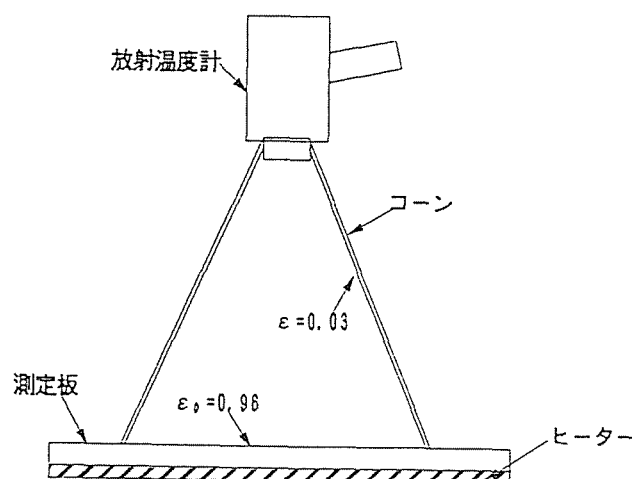


図 II-1 室内実験の概念図

なお，実験項目は，室内実験では①放射温度計の本体温度の影響，②測定物体の表面温度と放射温度計の出力の関係，③放射温度計の放射率補正の特性について，屋外実験では④天空からの放射量の影響，⑤天空からの放射量の補正法である．

3.1 放射温度計の特性に関する室内実験

室内実験で使用した測定板 ($10 \times 10\text{cm}$) は，放射率 0.96 の黒色塗料

を塗布し，熱電対を表面に貼付けた．また，測定中は周囲からの放射の影響がないように，内部に放射率0.03のアルミ箔を貼ったコーンを使用した(図Ⅱ-1)．放射温度計の設定放射率は1とした．

測定板に高い反射率のコーンをかぶせると，周囲からの放射($R(T_a)$)は(Ⅱ.6)式で表される．

$$R(T_a) = \gamma \cdot \rho \cdot \varepsilon_0 \cdot R(T) \quad (\text{Ⅱ.6})$$

ただし， γ ：コーンの反射率， ρ ：コーンの底面積と上部面積の比．

実験には， $\rho = 0.14$ と 0.28 の2種類のコーンを使用した．放射温度計の焦点距離の関係で， $\rho = 0.14$ のコーンはBとD放射温度計に， $\rho = 0.28$ のコーンはAとC放射温度計に使用した．

また，この時の実効放射率(ε_e)は，(Ⅱ.7)式で表される(Fuchs, et. al. (1966))．

$$\varepsilon_e = \varepsilon_0 / \{ \varepsilon_0 + \gamma \cdot \rho \cdot \varepsilon_0 \cdot (1 - \varepsilon_0) \} \quad (\text{Ⅱ.7})$$

この式で計算すると，0.96の測定板の実効放射率は，0.9998($\rho = 0.14$)と0.9997($\rho = 0.28$)であり，コーンを使用すると黒体に近い物体からの放射を受けたことになる．

(1) 放射温度計の本体温度の影響

放射温度計の本体温度と測定板の表面温度を種々変化させて実験を行った．本体温度は放射温度計本体にヒータを巻つけて，温度制御器で一定の温度(約20, 30, 40, 45℃)にした．また，測定板の表面温度は，20～50℃の範囲で約5℃ずつ変化させて測定を行った．室温の制御は特に行わなかったが約20℃であった．

(2) 測定物体の表面温度と放射温度計の出力の関係

測定物体の真の表面温度と，放射温度計の出力が一致するかどうかを確かめる必要がある．熱電対による測定値を真の表面温度として，これと放射温度計の出力と比較した．この解析は(1)の実験結果を使用した．

(3) 放射温度計の放射率補正の特性

放射温度計の設定放射率を種々変化させたときの「熱電対で測定した表面温度と放射温度計の出力の差」(以下，測定偏差と称する)を調べた．この実験は次の3種類について行った．①放射温度計の本体温度を約30℃に保ち，放射率0.96の測定板を約20，30，40℃に保ったとき，②放射温度計の本体温度を約20℃に保ち，放射率0.96の測定板の表面温度を約25，30，35，40，45，50℃に保ったとき，③放射温度計の本体温度を約20℃に保ち，放射率0.96，0.85，0.73，0.56の測定板の表面温度を約30℃に保ったときである．

②の実験で①の実験より本体温度を低くした理由は，本体温度と測定板の表面温度の差が大きい時の測定偏差を調べるためである．また，③の実験は放射率の設定が正しく行われないうきの測定偏差を調べるためである．

なお，③の実験に使用した種々の放射率の測定板は，黒色塗料と銀色の塗料を混合して作製した．

3.2 天空からの長波放射に関する屋外実験

周囲に建物などの物体がない場合，放射温度計に影響する周囲からの放射は，天空からの下向き長波放射である．天空からの下向き長波放射が，測定物体で反射して放射温度計に入り測定誤差となる．そのため屋外実験で，①天空からの放射の影響，②天空からの放射の補正法，の検討を行った．

(1) 天空からの放射の影響

種々の長波放射の反射率を持つ測定板の表面温度を測定して、天空からの長波放射の影響を調べた。測定板は $20 \times 17\text{cm}$ でアルミ板上に、黒体塗料と銀色塗料を混合して作製した。長波の反射率は0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50の10種類である。なお、反射率は D and S AERD 放射率計(昭和電工kk製)によって放射率(ε_0)を測定し、 $1 - \varepsilon_0$ から求めた。

測定は建物の屋上で行い、なるべく周囲物体からの放射の影響がないようにした。作製した測定板を屋上に並べ、手早く10枚の測定板の表面温度を放射温度計で測定し、測定板に貼付けた熱電対による表面温度と比較した。また、天空からの下向き長波放射量の測定は放射収支計の地面側センサにアダプタをかぶせて測定し、別に測定した日射量とアダプタの温度から計算によって求めた。また、放射温度計を天空に向けて、天空の温度(以下、天空放射温度)も測定した。

なお、使用した放射温度計は、本体温度の変化による測定偏差が小さく、 -70°C まで測定できた A.1 放射温度計を使用し、本体温度の制御は行わなかった。また、放射率の設定は 1 とした。

(2) 天空からの放射の補正法

屋外で測定する場合、天空からの放射による影響を補正しなければならない。そのため、3種類の補正法を検討した。すなわち、①天空放射温度による補正、②グラフによる補正、③参照板による補正である。

1) 天空放射温度による補正

天空放射温度と測定偏差の関係をあらかじめ調べておき、天空放射温度から測定偏差を推定する方法である。この実験は(1)の測定データを使用した。

2) グラフによる補正

放射温度計の設定放射率 $\varepsilon' = 1$ の場合、真の表面温度と放射温

度計の出力をグラフに表すと((Ⅱ.3)式参照), このグラフの勾配が測定物体の放射率になり, 定数項が天空からの放射による補正值になる(Fuchs, et. al., 1966; Conaway, et. al., 1967b).

放射率が0.96の測定板(以下, 参照板-大きさ 35×35 cm)を使用し, 熱電対で測定した参照板の真の表面温度と, 放射温度計の出力をグラフに書いて補正值を調べた. 解析は天空放射温度の変動が少ないと晴れの日について行った. また, 特定の日について前節で使った放射温度計(A.1)で天空放射温度を測定して天空からの放射の変動を調べた.

3) 参照板による補正

表面温度の測定が比較的容易な参照板の測定偏差と, 測定が比較的困難な測定物体の測定偏差の関係をあらかじめ求めておき, 参照板の測定偏差から測定物体の測定偏差を知る方法である.

参照板(放射率0.96の測定板)と植物(エゾノギシギシ)の葉について, 熱電対と放射温度計で表面温度を測定し, 両者の測定偏差の関係を求めた.

2)と3)の研究に使った放射温度計は受感部にサーモパイルを使用し, 長期間自記が可能なB放射温度計を使用した.

第4節 実験結果および考察

4.1 放射温度計の特性に関する室内実験

(1) 放射温度計の本体温度の影響

放射温度計の本体温度を変化させて出力を調べ, 結果を本体温度と測定偏差の関係で表した. その結果の代表的な例を図Ⅱ-2に示した.

図Ⅱ-2によると, 本体温度を変化させると測定偏差が変化し, しかも放射温度計によって測定偏差の状態が異なる. すなわち, 本体温度が高くなると測定偏差が正值で大きくなる製品と, 逆に負値で

大きくなる製品がある．測定偏差が負値で大きくなる B 放射温度計は放射センサにサーモパイルを使用したものである．

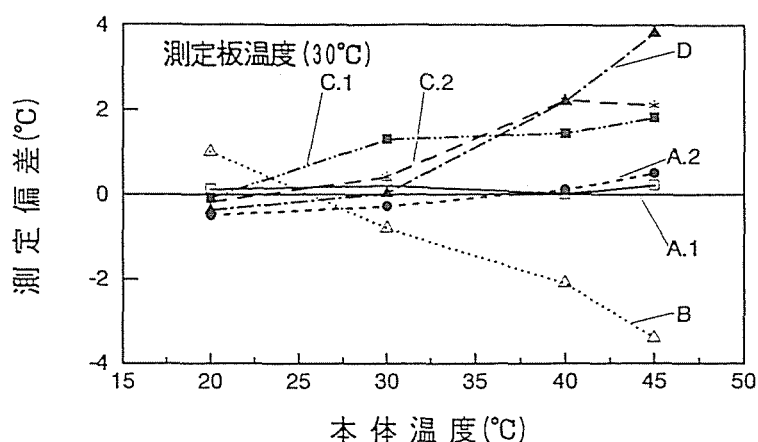


図 II -2 放射温度計本体温度の変化による測定偏差

第2節で示したように，設定放射率を 1 とすると，放射温度計の出力は本体温度の影響を受けないことが考えられた．しかし，図 II -2に示されているように測定偏差は本体温度の影響を受けている．この原因については放射温度計の内部で(Ⅱ.3)式のように処理されない場合や，放射センサによるチョッパ温度やサーモパイルの基準温度と，温度センサで測定した本体温度の違いなどが考えられる．

そのため「測定板の表面温度－本体温度」と測定偏差の関係を調べた．その結果，A と B 放射温度計は「測定板の表面温度－本体温度」が 0 に近いとき測定偏差の絶対値が小さく，「測定板の表面温度－本体温度」が大きくなると測定偏差の絶対値が大きくなる結果を示した(図 II -3(a))．しかし，C 放射温度計と D 放射温度計は必ずしもそのような関係を示さなかった(図 II -3(b))．

D放射温度計のカタログには内部補正のことについての記述がないが，図 II -4に示したごとく，本体温度が 30℃ 以上になると，急に測定偏差が大きくなる．また，C放射温度計の技術資料によると，本体温度で内部補正を行っていることが記述されているが，実験結果からは本体温度が 20℃ 以上になると，徐々に測定偏差が大きくなる傾向を示した．

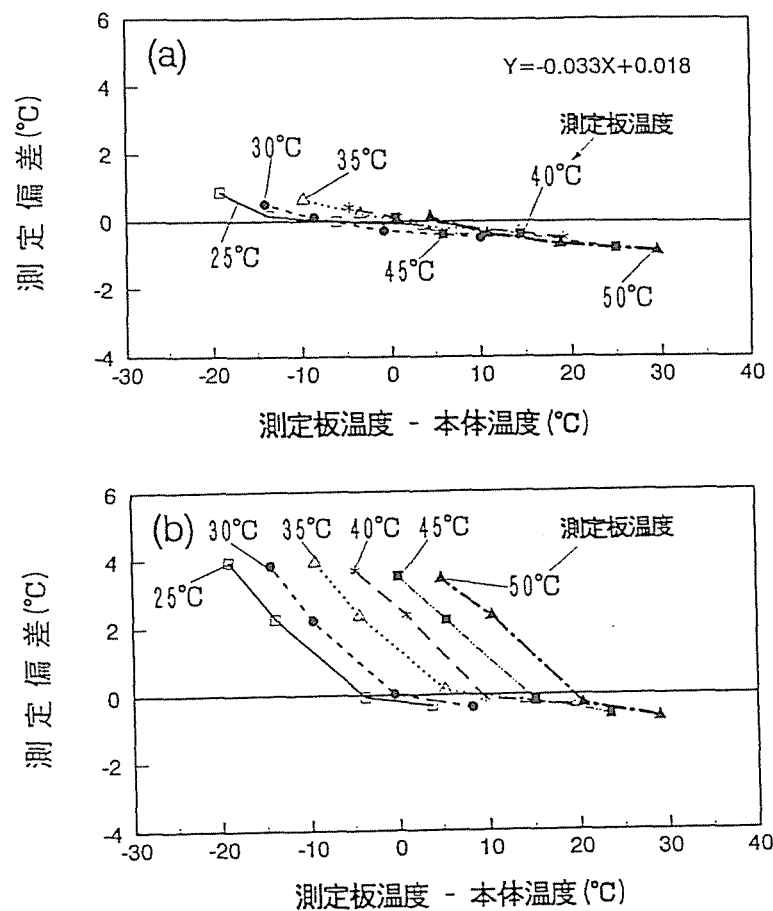


図 II - 3 測定板温度と本体温度の差と測定偏差の関係
((a) A.2 放射温度計 (b) D 放射温度計)

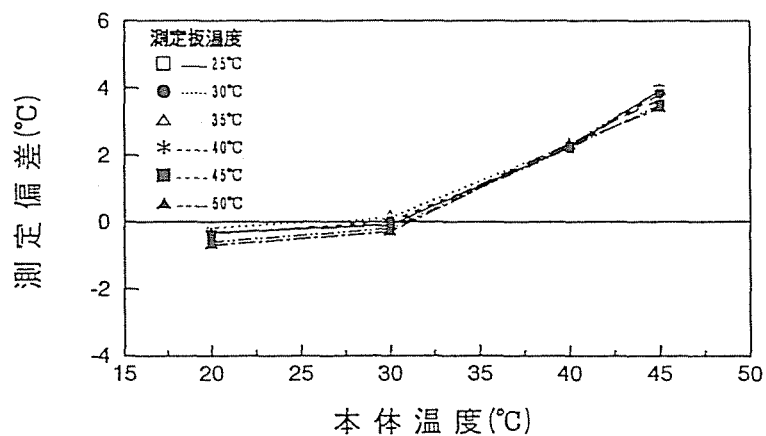


図 II - 4 D 放射温度計の本体温度の変化によって生じる測定偏差

以上の測定結果から次のことが明らかになった．①本体温度の変化が測定偏差に影響する．②その特性は各社によって異なり，外国製のD放射温度計は国産のAやB放射温度計とは明らかに異なる．③一般的に，本体温度を20～30℃にすると，測定偏差が小さくなる．

(2) 測定物体の表面温度と放射温度計の出力の関係

本体温度30℃で，熱電対による測定表面温度と放射温度計の出力とを比較した．その結果，熱電対による表面温度と放射温度計の出力は1:1に対応していた．したがって，(Ⅱ.4)式と(Ⅱ.5)式は(Ⅱ.8)式と(Ⅱ.9)式で表される(久保井ら,1977)．

$$t_w = [\varepsilon_o \cdot t + (1 - \varepsilon_o) \cdot (t_a - t_c)] / \varepsilon_o \quad (\text{Ⅱ.8})$$

$$t_w = t \quad (\text{Ⅱ.9})$$

ただし， t_w ：放射温度計の指示温度(℃)， t ， t_a ， t_c ：T， T_a ， T_c (K)のセルシウス度(℃)

熱電対で測定した表面温度と，放射温度計の出力との回帰式を計算すると，B放射温度計を除いて，回帰係数が0.98～1.07の範囲であり，定数項は-0.53～0.29の範囲であった．B放射温度計は回帰係数は0.85～0.94で，定数項は1.07～5.27であった．

しかし，(1)で明らかになったごとく，本体温度の変化による測定偏差は各計器で特徴があった．D放射温度計は本体温度を30℃に保ったとき，最も測定偏差が小さかった．したがって，30℃以外の本体温度のときの精度を調べた．

本体温度を一定(20，30，40，45℃)に保って，種々の表面温度に測定板を変化させたときの，熱電対による表面温度と放射温度計の出力の差(測定偏差に相当)について，標準偏差を計算した．その結果を表Ⅱ-2に示した．表Ⅱ-2には本体温度を変化させて，測定板の表面温度を一定に保ったときの標準偏差も示してある．

表Ⅱ-2によると，本体温度を一定にして測定板温度を変化させた場合，A.1，A.2，C.1，D放射温度計の標準偏差が小さく，1:1の直線との対応が良いことを示している．また，本体温度を変化させて測定板温度を一定にした場合，C.1とD放射温度計は標準偏差が大きい．これは(1)で示したごとく，これらの放射温度計では本体温度が20℃または30℃以上になると測定偏差が大きくなるからである．

表Ⅱ-2 測定板温度を変化させた場合と本体温度を変化させた場合の測定偏差の標準偏差

記号 \ 処理	測定偏差の標準偏差	
	板の温度変化	本体温度の変化
A.1	0.4 °C	0.2 °C
A.2	0.5	1.0
B	2.9	1.9
C.1	0.5	2.9
C.2	1.0	1.9
D	0.3	4.8

実際に放射温度計を使用する場合，測定板による検定を行い，熱電対で測定した表面温度と放射温度計の出力との回帰式を計算する．したがって，この回帰式からの偏差が問題になる．この回帰式からの平均偏差(RMS)を表Ⅱ-3に示した．表Ⅱ-3における20～45℃のRMS(Root Mean Square)は，本体温度20，30，40，45℃の全データについて回帰式を計算して求めたものである．C.1放射温度計は本体温度が高くなると，RMSが大きくなり回帰式からの変動が大きくなる．また，外国製のD放射温度計は本体温度を一定にするとRMSは小さいが，本体温度が変化(20～45℃で)するとRMSは大きくなる．A.1，A.2放射温度計は本体温度に関係なくRMSは小さい．

以上の実験結果から，次のことが明らかになった．①本体温度を一定にしないと精度よく測定できない放射温度計と，本体温度を一定にしなくても精度よく測定できる放射温度計がある．②各放射温度計とも本体温度を一定にして，真の表面温度と放射温度計の出力との回帰式を計算して補正するとRMSがより小さくなる．③この場

合，本体温度が40℃以下ではRMSは最大±0.3℃程度であることが，表Ⅱ-3から推定できる．

表Ⅱ-3 本体温度を一定にした場合の真の表面温度
と放射温度計の出力との回帰式による
測定誤差(RMS)

本体温度	20℃	30℃	40℃	45℃	20～45℃
A.1	0.1℃	0.1℃	0.1℃	0.1℃	0.1℃
A.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.4
B	0.2	0.2	0.3	0.3	1.7
C.1	0.1	0.3	0.2	0.9	1.1
C.2	0.1	0.3	0.3	0.4	0.8
D	0.1	0.1	0.1	0.1	1.7

(3) 放射温度計の放射率補正の特性

本体温度を約30℃に一定にして，設定放射率を変化させた結果の例を図Ⅱ-5(a)に示した．なお，測定板(放射率 0.96)の表面温度は約20，30，40℃の場合である．

図Ⅱ-5(a)で明らかのように，本体温度と測定板の表面温度がほぼ同一のとき，設定放射率を変化させても測定偏差の変動はほとんどない．実験の結果，使用した4社の放射温度計は図Ⅱ-5(a)とほぼ同じような傾向を示した．

これは，(Ⅱ.8)式を(Ⅱ.3)式の形式に変形すると(Ⅱ.10)式になり，したがって， $t=t_a=t_c$ なら(Ⅱ.10)式の右辺の分子は0で，放射温度計内部の放射率補正が作動しないためと思われる．

$$t_w = [\varepsilon_o \cdot t + (1 - \varepsilon_o) \cdot t_a - t_c] / \varepsilon' + t_c \quad (Ⅱ.10)$$

図Ⅱ-5(a)によると，設定放射率を種々変化させると，本体温度(t_c)が測定板の表面温度(t)より高い場合，正の測定偏差が生じ，逆の場合は負の測定偏差が生じた．本実験はコーンを使用しているので $t \approx t_a$ であり，また(Ⅱ.10)式から「本体温度と測定板の表面温度がほぼ同一のとき」は，「本体温度と周囲からの放射の相当温

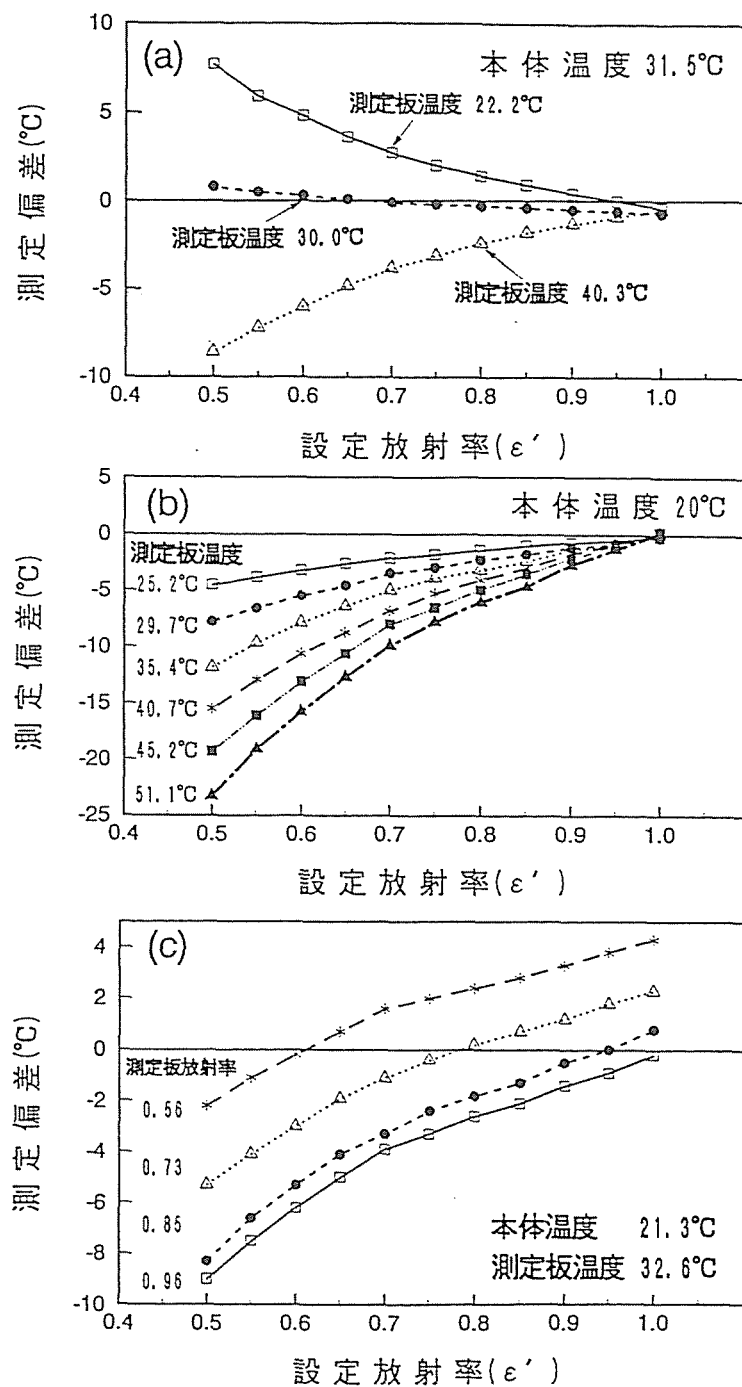


図 II - 5 設定放射率の変化によって生じる測定偏差
(A.2 放射温度計)

度(t_a)がほぼ同一のとき」である。したがって、本体温度(t_c)が周囲からの放射の相当温度(t_a)より高い場合は正の測定偏差が生じ、逆の場合は負の測定偏差が生じることになる。

実際、屋外の測定の場合、一般的に周囲からの放射の相当温度は天空放射温度であるため、本体温度の方が高く、正の測定偏差が発生する(図Ⅱ-6, 図Ⅱ-7参照)。

さらに、本体温度を約20℃に一定にし、測定板(放射率0.96)の表面温度を約25～50℃に変化させて、設定放射率の違いによる測定偏差を調べた。その結果の例を図Ⅱ-5(b)に示す。測定板の表面温度が高くなるにしたがって測定偏差の絶対値が大きくなる。

また、本体温度を約20℃に保ち、放射率0.96, 0.85, 0.73, 0.56の測定板の表面温度を約30℃に保ったときの、設定放射率の違いによる測定偏差の例を図Ⅱ-5(c)に示す。この図Ⅱ-5(b), (c)の傾向も各社の放射温度計で同じであった。図Ⅱ-5(b), (c)から、設定放射率0.70付近から測定偏差が大きくなり、設定放射率の精度が悪くなる。

以上の実験結果から、次のことが明らかになった。①各社の放射温度計の設定放射率に対する特性はほぼ同じである。②本体温度、測定物体の表面温度および周囲からの放射の相当温度が同一のとき、放射温度計の放射率を設定しても放射率補正は出来ない。③設定放射率を間違えると、本体温度が周囲からの放射の相当温度より高い場合、正の測定偏差が生じ、逆の場合は負の測定偏差が生じる。④設定放射率が0.70より小さくなると測定偏差は大きくなる。

4.2 天空からの長波放射に関する屋外実験

(1) 天空からの放射量の影響

熱電対で測定した表面温度と放射温度計の出力の差(測定偏差)と、測定板の反射率との関係を調べた。その例を図Ⅱ-6に示した。反射率が大きくなるにしたがって測定偏差は大きくなり、その関係はほぼ直線式で表される。したがって、下向き長波放射量が測定板

で反射して，測定偏差に影響していることが推定できる．

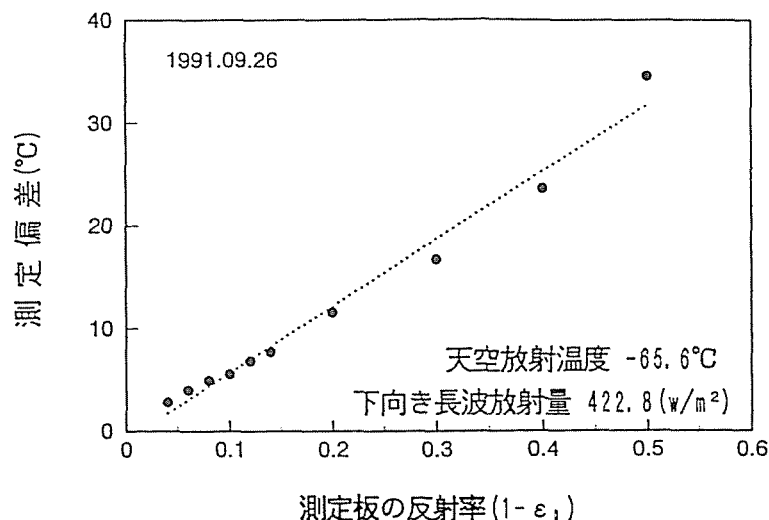


図 II - 6 天空からの長波放射によって生じる測定偏差

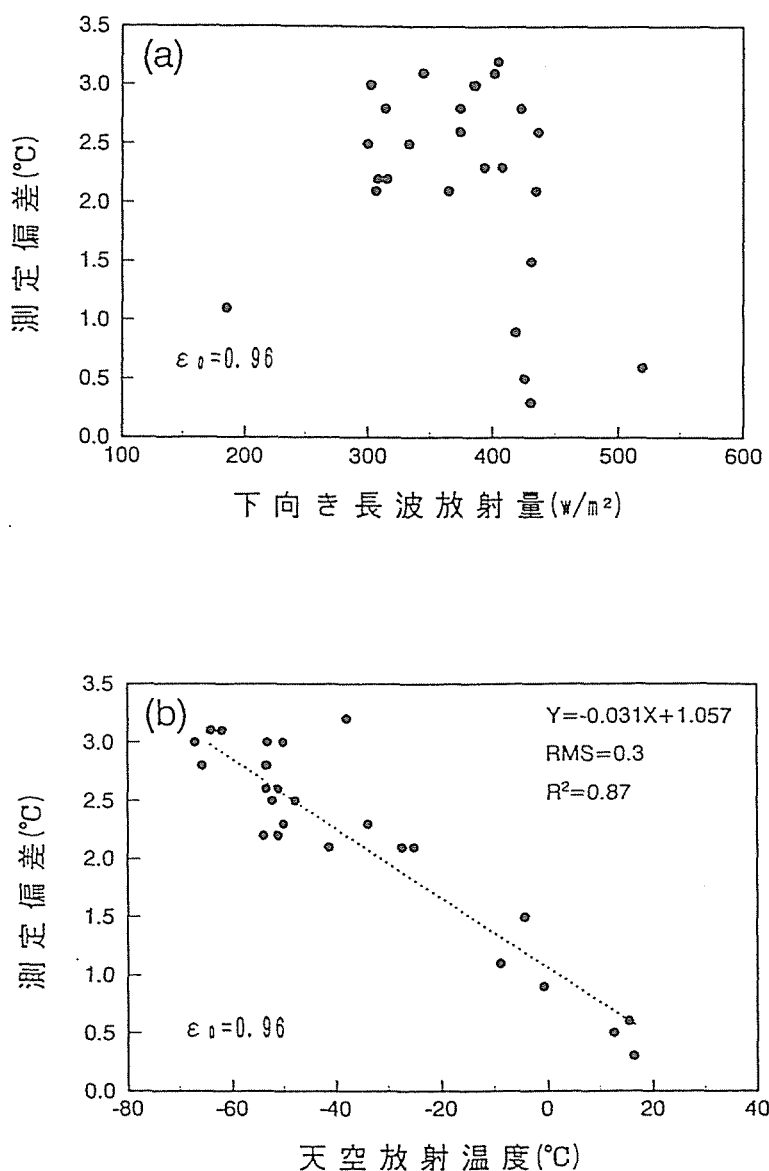
そのため測定偏差と放射収支計で測定した下向き長波放射量（以下，下向き全長波放射量）および放射温度計で測定した天空放射温度との関係を調べた．その結果の例を図 II - 7 (a), (b) に示した．いずれの反射率の測定板も図 II - 7 と同じように下向き全長波放射量との相関は悪いが，天空放射温度との相関は良い．

これは，①測定偏差に影響する長波放射量は，放射温度計で測定した $8 \sim 12 \mu\text{m}$ の窓領域の長波放射量であるが，放射収支計で測定した波長域（約 $3 \sim 60 \mu\text{m}$ ）の長波放射量ではない．また，②放射温度計で測定した天空放射温度は大気上層の温度であるが，放射収支計で測定した下向き全長波放射量は比較的大気下層からの長波放射量であり両者は関係がない，ことが考えられる．

そのため，札幌管区气象台による高層の気温と湿度を調べ，天空放射温度と比較した．その結果，晴れた日の天空放射温度は $300 \sim 100 \text{hPa}$ （高度約 $8 \sim 15 \text{km}$ ）付近の温度と近似の値であった．また，曇りの日は大気中の湿度の高い層（雲）の温度に近似の値であった．

Lorenz (1966) は天空からの放射による誤差は最大 1.0°C であるとしている．また，Sevendsen, et. al. (1989) は天空からの放射量 10

W/m^2 で放射率0.9～1.0の物体を測定するとき，測定誤差は $0.5^{\circ}C$ であると報告している．これらの天空からの放射による測定誤差は，図Ⅱ-7の測定偏差より小さい．これは国産の放射温度計が周囲からの放射を本体温度で補正しているため，周囲からの放射の相当温度と本体温度の差が測定誤差に加わるためと思われる．



図Ⅱ-7 (a)下向き長波放射量および(b)天空放射温度と測定偏差の関係

また，放射温度計の出力を本体温度で補正してない場合，(Ⅱ.1)式からわかるように天空からの放射量が小さくなるほど(天空放射温度が低くなるほど)測定偏差が小さくなる(Fuchs, et. al., 1966). しかし，本体温度で補正している場合は，図Ⅱ-7(b)に示されているように，逆に天空からの放射量が小さくなるほど測定偏差が大きくなる．今回の研究では，A.1放射温度計で測定した測定偏差の最大は約3.0℃にも達した．

以上の結果から，次のことが明らかになった．①屋外で測定した場合，測定偏差と天空放射温度は比例するが，下向き全長波放射とは比例しない．②天空放射温度の低下とともに測定偏差は大きくなる．

(2) 天空からの放射の補正

1) 天空放射温度による補正

前節(1)で判明したごとく測定偏差と天空放射温度は直線関係にあった．しかし，測定偏差は周囲からの放射の相当温度(T_a)と本体温度(T_c)に関係する．そのため，測定偏差と「天空放射温度－本体温度」の方が，測定偏差と「天空放射温度」のみより相関が良いことが推定できる．しかし，今回本体温度を測定していないため，本体温度が気温と等しいと仮定して，測定偏差と「天空放射温度－気温」の関係を調べた．その結果，測定偏差と「天空放射温度－気温」の寄与率は0.89で，RMSは0.30であった．図Ⅱ-7に示した測定偏差と「天空放射温度」の寄与率(0.87)やRMS(0.31)よりやや改良された．

すなわち，測定偏差と「天空放射温度－気温」の回帰式を計算しておくと，精度よく天空からの放射による測定偏差を推定できる．

2) グラフによる補正

図Ⅱ-7に示したように，測定期間中の天空放射温度は約-67～16℃の範囲であった．市販の放射温度計の測定範囲は，表Ⅱ-1に示したように，-50℃以下は測定できないものが多い．また，カタログ

に -50°C まで測定できるように示されていても，実際には測定できない測定器もある．したがって，このような機種を使用する場合は，別な方法で天空からの放射の影響を補正しなければならない．

熱電対による測定板の表面温度と放射温度計による測定板の表面温度について回帰式を計算し，回帰式の勾配および定数項を検討した．勾配は測定板の放射率に相当し，定数項は天空からの放射による測定偏差に相当する．

その結果を表Ⅱ-4に示す．

表Ⅱ-4 熱電対による表面温度と放射温度計による表面温度の
回帰式および測定偏差

月/日/時間	回帰式	天空放射温度 ($^{\circ}\text{C}$)	測定偏差 ($^{\circ}\text{C}$)
08/01/08-16	$Y=0.94X-2.94$	-0.6, -7.3	5.7 ± 1.0
08/04/07-19	$Y=0.98X-3.77$	-35.8, -43.7, -48.1	4.6 ± 0.7
08/11/07-18	$Y=0.93X-3.74$	-----	7.1 ± 1.0
08/18/00-24	$Y=0.95X-3.16$	3.8, -9.4, -7.7	4.7 ± 0.9
08/29/00-24	$Y=0.95X-3.65$	-----	4.9 ± 1.0
09/06/00-24	$Y=0.97X-5.31$	-----	6.0 ± 0.9
09/13/00-24	$Y=0.97X-4.55$	-----	5.3 ± 0.8
09/18/11-17	$Y=0.95X-3.39$	-40.5~-48.4	5.5 ± 0.6
09/22/09-17	$Y=0.95X-4.45$	-44.6~-55.6	6.1 ± 0.9

表Ⅱ-4によると，勾配は $0.93\sim 0.98$ ，定数項による測定偏差は約 $2.9\sim 5.3^{\circ}\text{C}$ である．これらのデータには天空からの放射が測定時間内で変動しているデータも含まれていると思われる．したがって，別に測定した天空放射温度の変動の比較的少ない2日間(9/18, 9/22)のデータを検討した．この2日間の勾配は 0.95 で，定数項による測定偏差は約 3.4°C と 4.5°C であった．また，平均の測定偏差は， 5.5°C と 6.1°C である．測定偏差と定数項の差が誤差であり，この中に設定放射率による誤差が含まれる．放射率設定を1として測定しているので，設定放射率による誤差は測定板の表面温度から $0.3\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ (平均 0.4)と推定できるため，測定偏差の推定誤差は約 1.7 と 1.2°C である．

表Ⅱ-4から勾配は 0.95 付近が多く，使用した測定板の窓領域の放

射率は0.95付近である可能性がある。測定板の窓領域の放射率を0.95と仮定して、表Ⅱ-4の定数項を計算し直すと、測定偏差との差は0.9と2.5℃になる。放射率設定による誤差0.4℃を差し引くと、測定偏差の推定誤差は0.5と2.1℃である。

測定物体の放射率(勾配)をあらかじめ測定し、熱電対で測定した真の表面温度と放射温度計で測定した表面温度をグラフにプロットすると、Y軸の切片が天空からの放射による測定偏差である。この方法は比較的精度は良くないが、1回の熱電対と放射温度計の測定値から簡単に測定偏差を求めることができる。

植物の葉温などを測定する場合、葉の放射率(ϵ_0)をあらかじめ測定しておく、熱電対による葉温(t)と放射温度計による葉温(t_w)を、 $t_w = \epsilon_0 \cdot t + b$ の式に代入すると、定数項(b)が天空からの放射による測定偏差である。この値は天空状態が変化しない時間帯内で利用できる。

3) 参照板による補正

前節の2)の方法は天空からの放射量が変わったかどうかを知ることが困難である。また、表面温度を自記計で連続測定している時は不便である。そのため簡単な方法として参照板を作製し、参照板の測定偏差と測定物体の測定偏差の関係をあらかじめ求めておく方法が考えられる。参照板の測定偏差を連続測定して、後に測定物体の測定偏差を計算で求めることができる。

図Ⅱ-8は参照板(放射率=0.96)の測定偏差と植物葉(エゾノギシギシ)の測定偏差との関係である。RMSは1.0℃でやや大きい、これは熱電対の接触などのため葉の測定偏差の変動が大きいためである。

参照板を使用した補正法は conaway, et. al. (1967a) が実用的に使用しているが、その補正精度については記述がない。

以上3種類の方法は一長一短がある。①天空放射温度による方法は比較的精度が良いが、低温まで測定できる放射温度計が必要であり、あらかじめ天空放射温度と測定偏差の関係を求めておく必要がある。②グラフによる方法は簡単であるが、①の方法と比較して精

度が悪く，あらかじめ測定物体の放射率を求めておく必要がある．
 ③ 参照板による方法は自記計で連続測定の場合に有効であるが，あらかじめ参照板と測定物体の測定偏差の関係を求めておく必要がある．

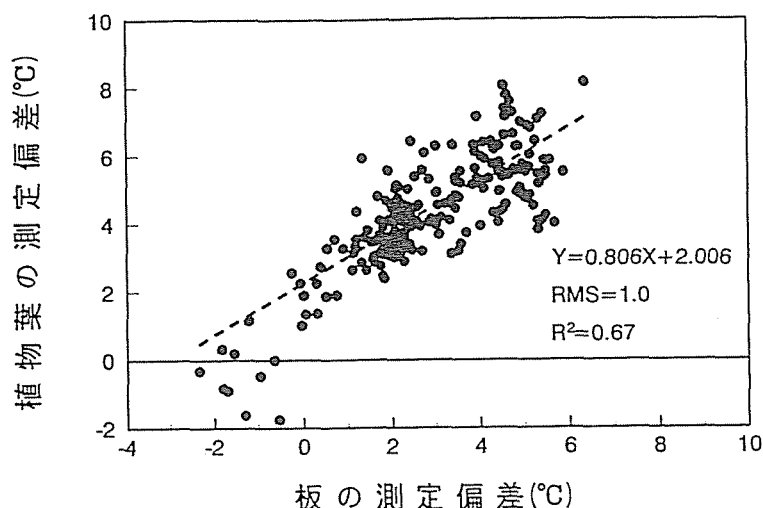


図 II -8 参照板の測定偏差と植物葉の測定偏差の関係

第5節 まとめ

放射温度計は非接触型の表面温度計で，植物体などの表面温度が容易に測定できるようになった．しかし，放射温度計の特性はあまり良く知られていない．

放射温度計は測定物体からの長波放射を測定して温度変換している．そのため周囲からの長波放射の反射が出力に含まれる．その影響を除くため，国産の放射温度計は本体温度で補償している．したがって，本体温度と著しく異なる温度からの長波放射が測定物体で反射する場合，大きな測定誤差が生じる．そのため放射温度計の特性と補正法を検討した．

測定項目は①放射温度計の本体温度の影響，②放射温度計の出力の直線性，③放射温度計の放射率補正の特性，④天空からの放射の影響，⑤天空からの放射の補正法，である．

その結果，①放射温度計の本体温度の影響については，本体温度

の変化が測定偏差に影響する。その特性は各社によって異なり、外国製の D 放射温度計は国産の A や B 放射温度計の反応とは明らかに異なる。しかし、一般的に、本体温度を $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 以下にして測定することが望ましく、その場合に測定偏差が小さくなる。

②放射温度計の出力の直線性については、本体温度を一定にしないと精度よく測定できない放射温度計と、本体温度を一定にしなくても精度よく測定できる放射温度計がある。しかし、各放射温度計とも本体温度を一定にして、真の表面温度と放射温度計の出力との回帰式を計算して補正すると RMS が小さくなる。この場合、本体温度が 40°C 以下では RMS は最大 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 程度である。

③放射温度計の放射率の補正については、各社の放射温度計の設定放射率に対する特性はほぼ同じである。本体温度、測定物体の温度および周囲からの放射の相当温度が同一のとき、放射温度計の設定放射率は作動しない。設定放射率を間違えると、本体温度が周囲からの放射の相当温度より高い場合、正の測定偏差（放射温度計の指示温度の方が真の温度より低い）が生じ、逆の場合は負の測定偏差が生じる。また、設定放射率が 0.70 より小さくなると測定偏差は大きくなる。

④天空からの放射の影響については、屋外で放射温度計を使用する場合、測定偏差と天空放射温度は比例するが、下向き全長波放射とは比例しない。天空放射温度の低下とともに測定偏差は大きくなる。

⑤天空からの放射の補正法の検討については、3種類の方法で行った。

(a) 天空放射温度による補正については、測定物体の長波の反射率が小さい場合、「天空放射温度－気温」によって測定偏差を精度よく推定できる。

(b) グラフによる補正については、測定物体の放射率をあらかじめ求めておくと、1回の熱電対で測定した真の温度と放射温度計の出力から測定偏差をグラフで求めることができる。測定偏差の推定

精度はやや悪いが簡単な方法である。

(c)参照板による補正については，参照板の測定偏差と測定物体の測定偏差の関係をあらかじめ求めておく方法である。植物葉を使用した実験では，推定精度は $RMS=1.0^{\circ}C$ であった。これは長期間表面温度を自記する場合には有用な方法である。

放射温度計は非接触性のため利用範囲が広い。たとえば，今まで測定できなかった群落表面温度などが，放射温度計を使用して容易に測定できるようになった。しかし，放射温度計を使用する場合，その特性を良く理解して使用する必要がある。以後の研究はこの章の研究結果を基に群落表面温度を測定した。

第Ⅲ章 作物群落の窓領域の放射率

第 III 章 作物群落の窓領域の放射率

第 1 節 はじめに

放射温度計によって作物葉や作物群落の表面温度を測定する場合、測定物体の放射率が影響する。したがって、正確な表面温度を得るために測定物体の放射率を知らなければならない。しかも、放射温度計は大気中の吸収の少ない窓領域の放射を使用しているため、放射率は窓領域の値である。

現在まで、窓領域の放射率の測定例は比較的少なく、特に作物葉や作物群落の窓領域の放射率について報告された例は少ない。放射温度計を用いて表面温度を正しく測定するためにも、作物葉や作物群落の窓領域の放射率を知る必要がある。そのため携帯型の放射温度計を利用して、数種の作物葉や作物群落の窓領域の放射率（以下、単に放射率）を測定した。

野外で放射温度計を使用して放射率を測定する方法は種々発表されている。たとえば、Fuchsら（1966）は高い反射率のコーンを利用して放射率の測定を行っている。Idsoら（1969）、および Idsoら（1976）は特別な装置を使用しないで、参照板を用いて放射率の測定を行っている。また、Buettnerら（1965）、Casellesら（1988）および Sobrinoら（1990）らは、内部に高い反射率をもつ測定箱によって放射率を測定している。

コーンを使用した方法（以下、コーン法）や参照板を用いた方法は植物葉の放射率の測定に適していて、植物の葉について 0.935～0.995 の放射率を得ている（Idsoら、1976）。しかし、コーン法によって群落の放射率を測定した例は、被覆率がほぼ 100% であるアルファルファ（0.977）、スーダングラス（0.976）のみである（Fuchsら、1966）。高い反射率の測定箱を使用した方法（以下、ボックス法）は群落などの放射率の測定に適すると思われるが、オレンジ園（0.975

～0.985)の測定例のみである(Casellesら,1988)。

この章はボックス法による放射率測定法や計算式を改良し，作物葉や作物群落の放射率(以下，単に群落放射率)を測定したものである。

第2節 放射率測定の理論と方法

2.1 測定装置

使用した放射率の測定装置はBuettnerら(1965)が使用したボックス法の装置を若干改良したものである。すなわち，図Ⅲ-1に示すように，測定箱の大きさは $90 \times 90 \times 95$ cmで，放射率0.03のアルミフォイルを貼った引出し蓋(以下，引出蓋)，放射率0.96の黒色塗料を塗った天井のアルミ板(以下，放射蓋)，面発熱ヒータ，断熱板および内面に放射率0.03のアルミフォイルを貼った側壁で構成されている。天井部の放射蓋はヒータによって表面温度がコントロールできようになっており，反射蓋は横方向に引出されるようになっている。この放射蓋の3箇所に熱電対を貼って表面温度を測定した。

ボックス法によるBuettnerら(1965)やCasellesら(1988)の研究では，天井中央に放射温度計の先端を挿入できる小穴を開けて測定している。本研究の土壌や作物葉の測定はこれと同じように天井中央の穴に放射温度計を設置して行った。しかし，群落放射率を測定するためには，放射温度計をスキャンさせなければならない。スキャンのため穴が大きくなり天井中央に穴を開けて測定すると，この部分の影響があると考えられる。そのため，天井に近い側壁にスキャンできる長方形の穴を開け，この穴からスキャンしながら表面温度を測定できるようにした。この穴から測定すると群落の表面の垂直面に対して， 45° の角度(天頂角－以下角度は天頂角)で照準することになる。

なお，測定穴の影響や測定角度の影響を調べるため，天井中央(天頂角 0°)と側壁中央(天頂角 60°)にも長方形の穴をあけて測定した。

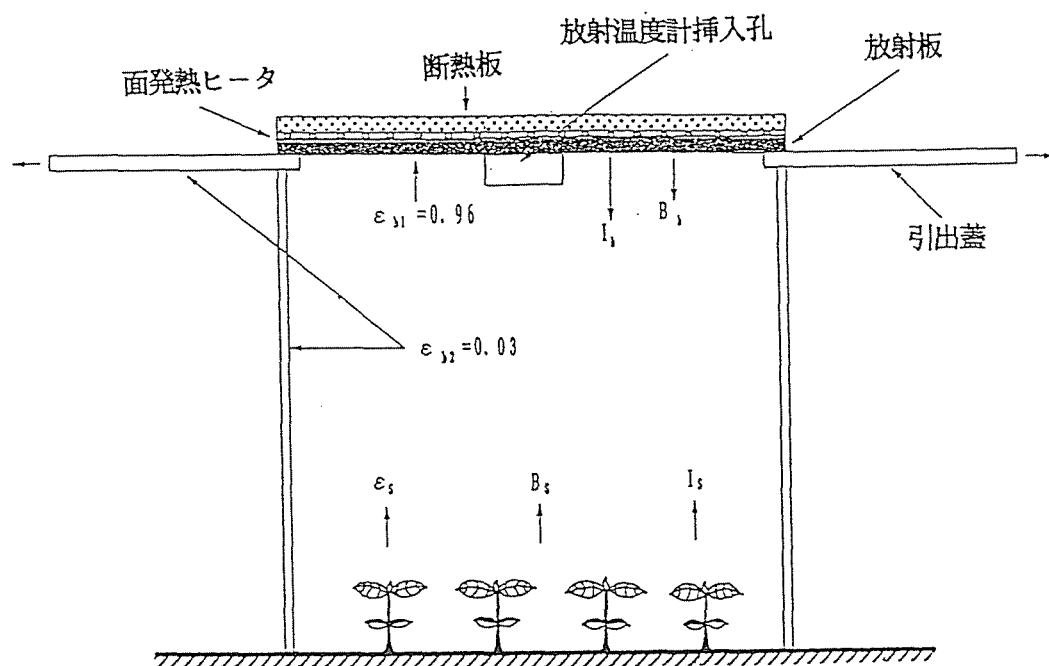


図 Ⅲ - 1 放射率測定装置の概念図

2.2 測定理論

放射率測定箱の上向き放射量 (I_s) は (Ⅲ.1) 式で, 下向き放射量 (I_b) は (Ⅲ.2) 式で表される (Buettnerら, 1965)。

$$I_s = \epsilon_s B_s + (1 - \epsilon_s) I_b \quad (\text{Ⅲ.1})$$

$$I_b = \epsilon_b B_b + (1 - \epsilon_b) I_s \quad (\text{Ⅲ.2})$$

ただし, ϵ_s : 測定物体の放射率 (ただし, 測定波長範囲)
 ϵ_b : 天井の放射率 (ただし, 測定波長範囲, ϵ_{b1} は放射蓋の放射率, ϵ_{b2} は引出蓋の放射率), B_s : 温度 T_s (K) の測定物体からの放射量 (ただし, 測定波長範囲), B_b : 温度 T_b (K) の天井からの放射量 (ただし, 測定波長範囲, B_{b1} は天井が放射蓋の時の放射量, B_{b2} は天井が引出蓋の時の放射量), I_{s1} : 天井が放射蓋の時に放射温度計に入射する放射量, I_{s2} : 天井が引出蓋の時に放射温度計に入射する放射量

(Ⅲ.1), (Ⅲ.2)式から I_b を消去すると

$$I_s = \varepsilon_s B_s + (1 - \varepsilon_s) \{ \varepsilon_b B_b + (1 - \varepsilon_b) I_s \} \quad (\text{Ⅲ.3})$$

したがって

$$I_{s1} = \varepsilon_s B_s + (1 - \varepsilon_s) \{ \varepsilon_{b1} B_{b1} + (1 - \varepsilon_{b1}) I_{s1} \} \quad (\text{Ⅲ.4})$$

$$I_{s2} = \varepsilon_s B_s + (1 - \varepsilon_s) \{ \varepsilon_{b2} B_{b2} + (1 - \varepsilon_{b2}) I_{s2} \} \quad (\text{Ⅲ.5})$$

(Ⅲ.4), (Ⅲ.5)式から測定物体の放射率 (ε_s) は (Ⅲ.6)式で表される.

$$\begin{aligned} \varepsilon_s = 1 - (I_{s1} - I_{s2}) / \{ & \varepsilon_{b1} \cdot B_{b1} - \varepsilon_{b2} \cdot B_{b2} \\ & + (1 - \varepsilon_{b1}) I_{s1} - (1 - \varepsilon_{b2}) I_{s2} \} \end{aligned} \quad (\text{Ⅲ.6})$$

本実験では放射温度計による指示温度を使用するため, 放射温度計の温度変換係数を $f(t)$ を導入することを考えた. すなわち, 放射温度計の測定温度 ($t, ^\circ\text{C}$) は (Ⅲ.7)式で表される.

$$t_s = f(t_s) \cdot I_s \quad (\text{Ⅲ.7})$$

この関係を (Ⅲ.6)式に代入して整理すると (Ⅲ.8)式になる.

$$\begin{aligned} \varepsilon_s = 1 - (t_{s1} - t_{s2}) / \{ & (\varepsilon_{b1} \cdot B_{b1} - \varepsilon_{b2} \cdot B_{b2}) f(t_s) \\ & + (1 - \varepsilon_{b1}) t_{s1} - (1 - \varepsilon_{b2}) t_{s2} \} \end{aligned} \quad (\text{Ⅲ.8})$$

(Ⅲ.8)式を変形すると, (Ⅲ.9)式になる.

$$\begin{aligned} \varepsilon_s = & (B_{b1} \cdot f(t_s) - t_{s1} + \Delta \alpha) / (B_{b1} \cdot f(t_s) \\ & - t_{s2} + \Delta \alpha) \end{aligned} \quad (\text{Ⅲ.9})$$

ただし, $\Delta \alpha = -(1 - \varepsilon_{b1}) B_{b1} \cdot f(t_s) - \varepsilon_{b2} \cdot B_{b2} \cdot f(t_s) - (1 - \varepsilon_{b1}) t_{s1} + \varepsilon_{b2} \cdot t_{s2}$

また、 $\varepsilon_{b1}=1$ 、 $\varepsilon_{b2}=0$ と仮定して、(Ⅲ.8)式に代入すると(Ⅲ.10)式になる。

$$\varepsilon_s = (B_{b1} \cdot f(t_s) - t_{s1}) / (B_{b1} \cdot f(t_s) - t_{s2}) \quad (\text{Ⅲ.10})$$

したがって、(9)式の $\Delta \alpha$ は、 $\varepsilon_{b1} \neq 1$ 、 $\varepsilon_{b2} \neq 0$ であるための補正量である。

(Ⅲ.9)、(Ⅲ.10)式を使用すると、放射温度計の測定温度(t_{s1} 、 t_{s2})、放射温度計の温度変換係数($f(t)$)、放射蓋や引出蓋の温度を使用して、群落放射率などが測定できる。(Ⅲ.9)式による放射率と(Ⅲ.10)式による放射率の差は約0.002で、(Ⅲ.9)式の方が小さい値になる。本研究で作物葉や作物の群落放射率の計算に、(Ⅲ.9)式を使用した。

なお、放射温度計の温度変換係数 $f(t)$ は室内実験によって決定した。また、放射量(B_{b1} 、 B_{b2})はPlankの式に放射蓋や引出蓋の表面温度と放射温度計の測定波長範囲(6~12 μ m)を使用し、この波長範囲で積分して求めた。

2.3 測定方法

群落放射率の測定は、放射温度計を首振り器に固定し、天井付近の測壁にあけた長方形の穴に先端を挿入し、約45°の角度でスキャンさせながら群落表面温度を測定した。測定手順は、①天井を引出蓋にして放射温度計でスキャンしながら群落表面温度を測定し、②その後、すばやく引出蓋を引出してスキャンしながら群落表面温度を測定した。この場合、天井の放射蓋の温度は測定物体の表面温度より20℃以上にしなければ誤差が大きくなる(Casellesら, 1988)。今回の測定では群落表面温度が約15~25℃の範囲であるので、放射蓋の温度は45~55℃とした。

作物葉の放射率の測定の場合は、群落の手順と同じであるが、放射温度計をスキャンしないで作物葉を照準した状態のままで測定し

た．

使用した放射温度計はIT2-01(株式会社キーエンス)で，測定波長範囲は $6\sim 12\mu\text{m}$ ，視野角は約 7° である．なお，測定表面温度の出力はペンレコードに記録し，各測定は3回以上行って平均値を求めた．

2.4 測定項目

今回の測定法や計算式の妥当性を検討するため，最初に①黒色板の放射率について測定を行い，次いで群落放射率に影響する②土壌の放射率，③作物葉の放射率を測定し，④群落放射率について測定を行った．

(1) 黒色板の放射率

アルミ板(90x90cm)に黒色塗料(3M Velvet Coating 2010-住友スリーエム社製)を塗った黒色板の放射率を測定した．この黒色板の全波長の放射率はD and S AERD放射率計(昭和電工kk製)で測定したところ0.96であった．

(2) 土壌の放射率

作物の被覆率が小さい場合，群落放射率は土壌面の放射率の影響を受ける．そのため群落放射率を測定した畑の近くの土壌面の放射率の特性を測定した．ここの土壌は沖積性褐色低地土(植壊土)である．測定は表面をなるべく平滑にし，種々な土壌含水比の時期の放射率を測定した．なお，土壌水分は放射率測定後，放射温度計の視野内の表面土壌を採取し，乾燥重量法によって求めた．

(3) 作物葉の放射率

作物の被覆率が大きくなると，群落放射率は作物葉の放射率に近くなることが予想される．そのため作物葉の放射率を測定した．また，作物群落には種々な角度の作物葉が存在する．そのため作物葉

の角度と放射率の関係も調べた。

測定した作物葉は、ダイズ、トウモロコシ、キャベツ、バレイショ、コムギ、エンバクである。測定期間は6月から8月であるが、コムギ、キャベツなど1部を除いて、主な測定日は生育の最も旺盛な7月中旬から8月中旬である。

また、トウモロコシの葉について、葉が充分大きくなった生育後期(8月19～29日)に、作物葉の角度と放射率の関係も測定した。測定は放射温度計を天井の穴に固定し、葉を 0° (水平)、 15° 、 30° 、 45° 、 60° に傾斜させて行った。 60° 以上については放射温度計の視野の中に、葉以外に土壌が入り測定できなかった。

(4) 群落放射率

群落放射率を測定する前に、測定穴の影響や放射温度計の設置位置(測定角)の影響を調べた。すなわち、測定箱の天井(測定角 0°)、側壁上部(測定角 45°)、側壁中央(測定角 60°)の位置に放射温度計を設置し、被覆率70%のダイズ畑について、放射率を測定し比較した。

群落放射率はダイズ、トウモロコシ、ジャガイモ、コムギ、キャベツなどの各々の畑について、定期的に放射率、被覆率、土壌水分を測定し、次の3項目について解析した。しかし、「②被覆率と群落放射率の関係」については、定期的観測と別に葉を間引きしながら測定した。

1) 作物の種類と群落放射率

ダイズ畑、トウモロコシ畑、バレイショ畑、コムギ畑について、被覆率、土壌水分がほぼ同じ時の群落放射率を比較した。

2) 被覆率と群落放射率の関係

被覆率と群落放射率の関係を知るためには、土壌水分の影響を取り除く必要がある。そのためダイズ畑について、葉を間引きしながら被覆率と放射率の関係を調べた。測定時の土壌の含水比は11%で、被覆率は70%、61%、52%、34%、0%の5段階である。

3) 土壌水分と群落放射率の関係

土壌水分と群落放射率の関係を調べるため、被覆率に変化なく、土壌水分のみが変化した近接した日のデータについて解析した。

なお、被覆率は測定畑について赤外線写真を撮り、その写真の作物部分をスキャナで読み取り計算した。土壌水分は畝間の土壌を採取し、乾燥重量法によって求めた。

第3節 測定結果および考察

3.1 黒色板の放射率

測定した黒色板の放射率は 0.965 ± 0.007 であった。先にも記したごとく、黒色板の全赤外波長域の放射率は0.96である。全赤外波長域の放射率を測定した D and S AERD 放射率計(昭和電工kk製)は小数点以下2位までしか求められないが、小数点以下3位まで推定すると、放射率は0.955~0.964の範囲であることが予想できる。

一方、住友スリーエム社の資料によると、黒色塗料(3M Velvet Coating 2010)の摩擦塗布面は、広い波長域で均一な高い放射率を持つとされている。すなわち、全赤外波長域(2~35 μm)の放射率が0.98以上、近赤外域(1.4~2.5 μm)の放射率も0.98以上、また、近赤外域の0.7~1.4 μm の放射率は0.995以上とされている。塗布法(ハケ塗り)の違いのためか、今回はこのような高い放射率は得られなかったが、全赤外波長域で高い放射率を持つことから波長による変動は少なく、したがって全赤外波長域の放射率と窓領域の放射率の差は小さいと思われる。

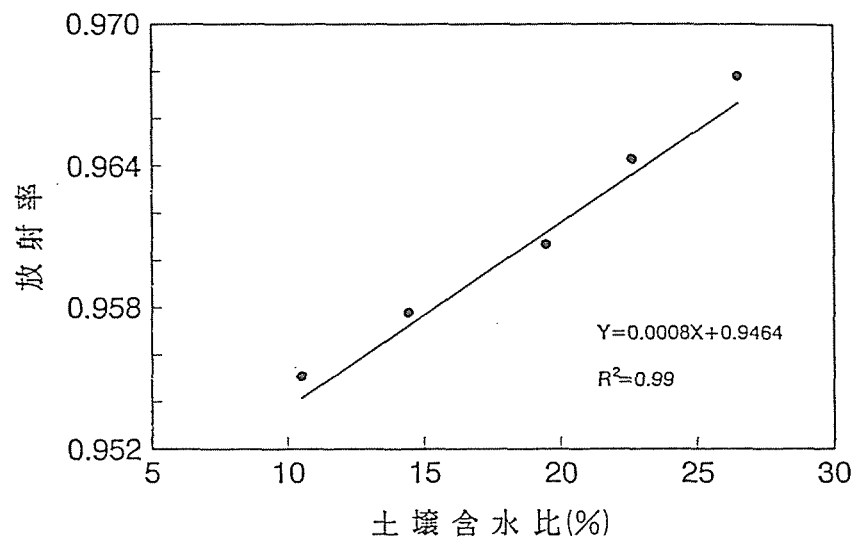
黒色板の窓領域の放射率(0.965 ± 0.007)と全赤外波長域の放射率(0.955~0.964)が近似であったこと、また黒色塗料の全赤外波長域の放射率と窓領域の放射率の差は小さいと考えられることから、今回の測定法や計算式はほぼ妥当であると思われる。

3.2 土壌の放射率

種々な時期に測定した土壌含水比と放射率の関係を図Ⅲ-2に示す。土壌含水比の増加とともに放射率は直線的に増加している。放射率の増加割合は含水比10%当り約0.008である。

土壌水分の増加に伴って放射率が増加することはFuchsら(1968), Buettnerら(1965), 谷(1987)も観測している。谷(1987)は2段階の土壌水分しか測定していないが, これらの測定値は含水比10%当り約0.012の放射率の増加割合になる。また, Fuchsら(1968)は Plainfield sandについて含水率と放射率の関係を調べている。Fuchsらの測定値の放射率の増加割合は, 含水率10%当り約0.08の増加率を示している。これを含水比に換算すると10%当り約0.11程度と計算でき, 今回の測定値より大きい。

いずれにしても, 土壌の放射率は今回の測定土壌水分の範囲内では, 土壌水分の増加に伴って直線的に増加する。



図Ⅲ-2 土壌含水比と土壌放射率の関係

3.3 作物葉の放射率

6種類の作物葉の放射率についての測定結果を表Ⅲ-1に示す。

表Ⅲ-1によると, 放射率は0.965~0.989の範囲で, 最も大きい放

射率はコムギの0.989で、最も小さい放射率はバレイショの0.965であった。今回の測定ではイネ科のトウモロコシ、コムギ、エンバクの葉はダイズ、キャベツ、バレイショなどの葉より大きい放射率を示した。Idsoら(1969)は種々な植物の葉について放射率を測定し、その範囲は0.938～0.995と報告しているが、0.961～0.979の範囲の放射率の植物葉が多い。今回の測定もイネ科のトウモロコシ、コムギ、エンバクの葉を除くこの範囲に入っている。

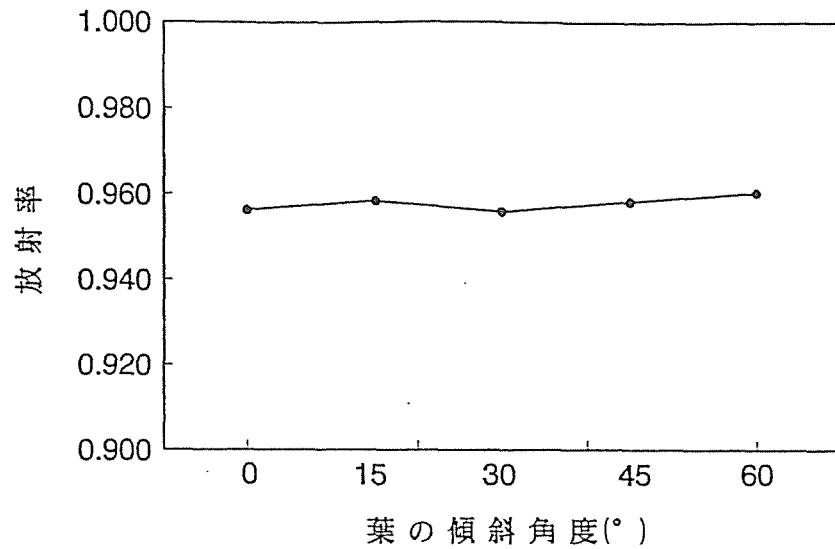
表Ⅲ-1 作物葉の放射率

作物	放射率±標準偏差
ダイズ	0.977±0.007
トウモロコシ	0.981±0.007
キャベツ	0.978±0.009
バレイショ	0.965±0.012
コムギ	0.989±0.004
エンバク	0.980±0.003
平均	0.978

Idsoら(1969)が測定した種々な植物葉にトウモロコシ葉も含まれているが、 0.944 ± 0.004 と小さい放射率を観測している。今回の測定値との違いは明かでないが、品種や葉令の違いによる差もあると思われる。今回が測定した生育後期のトウモロコシ葉の放射率も、 0.956 ± 0.011 と比較的小さい放射率を示した(図Ⅲ-3参照)。生育時期と放射率について、Sobrinoら(1993)は緑色草の放射率は 0.973 ± 0.008 、黄色草の放射率は 0.945 ± 0.012 と色が変化すると放射率が違うことを報告している。なお、生育時期と放射率の関係は、さらに研究する必要がある。

一般に放射率は角度によって異なる(大野ら, 1982)。そのためトウモロコシ葉について放射率と葉の角度の関係を調べた。その結果を図Ⅲ-3に示す。60°未満の測定角度では葉の放射率にほとんど有意差がない。谷(1987)は土壌や枯草について、60°付近まで放射率に大きな変化がないことを観測している。また、金属の金の放射率について60°付近まで大きな差がないことが計算されている(大野ら, 1982)。したがって、作物葉の場合も60°付近まで放射率はほ

ば一定と考えても良いと思われる。



図Ⅲ-3 トウモロコシ葉の傾斜角度と放射率の関係

3.4 群落放射率

(1) 放射温度計の設置位置と群落放射率の関係

群落放射率を測定する前にダイズ畑について、放射温度計の設置位置による放射率の影響を調べた。3つの設置位置(測定角:0°, 45°, 60°)における結果を表Ⅲ-2に示す。

表Ⅲ-2 作物群落(ダイズ)と測定角度の関係

測定角度	0°	45°	60°
放射率	0.971±0.005	0.973±0.003	0.972±0.004

表Ⅲ-2によると測定角45°の時が最も放射率が大きく、次いで60°, 0°の順である。測定角0°より45°の方が放射率が大きいのは、天井に開けた穴の影響と考えられるが、これらの平均値について有意性を検定すると、いずれの平均値間にも有意差(5%)はなかった。しかし、以後の群落放射率の測定は放射率が最も大きかった45°の位置に放射温度計を設置して測定した。

(2) 作物の種類と群落放射率

作物の群落放射率は，作物の被覆率，土壌水分，作物葉の放射率，作物葉の位置や傾斜などによって異なることが予想できる．近似の被覆率と土壌水分の日について，作物の種類による群落放射率の違いを調べた．その結果を表Ⅲ-3に示す．表Ⅲ-3には参考のため被覆率が70%以上のキャベツと芝生の測定例も記載している．

表Ⅲ-3 作物群落の放射率

作物畑	放射率±標準偏差	被覆率	含水比 (土壌)
コムギ	0.979±0.004	47%	19%
バレイショ	0.955±0.014	44	16
ダイズ	0.974±0.002	47	9
トウモロコシ	0.957±0.009	70%	13%
バレイショ	0.967±0.008	77	9
ダイズ	0.973±0.003	70	11
キャベツ	0.974±0.003	91%	34%
芝生	0.988±0.003	100	-

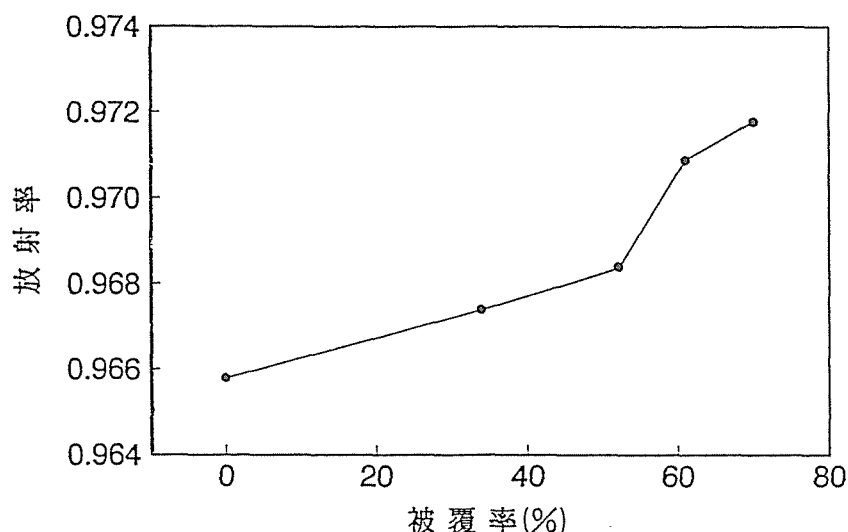
表Ⅲ-3によると，トウモロコシ畑を除いて被覆率が40%台，70%台とも，単葉の放射率が高い畑が高い群落放射率を示している．3.3節の葉の傾斜角度による放射率の差が60°付近まで小さいことと考え合わせると，群落放射率は単葉の放射率に大きく影響され，群落を構成する作物の体型(葉の位置や傾斜)の違いによる影響は小さいことが推察できる．

なお，トウモロコシ畑の70%被覆率の群落放射率が，単葉の放射率より著しく小さいのは，土壌水分の影響(表Ⅲ-4 参照)と考えられるが，さらに研究する必要がある．

群落放射率の測定について発表された例は，被覆率がほぼ100%であるアルファルファ(0.977)，スーダングラス(0.976)の例のみである(Fuchsら，1968)．これらの群落放射率も今回の測定値と近似の値である．

(3) 被覆率と群落放射率の関係

ダイズ畑について被覆率と群落放射率の測定結果を図Ⅲ-4に示す。図Ⅲ-4によるとダイズの被覆率の増加に伴って群落放射率も増加している。また、ダイズの被覆率が約60%以上になると、単葉の放射率(0.977 ± 0.007)に急に近くなる。この結果は表Ⅲ-3の結果と略一致する。



図Ⅲ-4 ダイズ畑の被覆率と放射率の関係

すなわち、表Ⅲ-3のダイズ畑の被覆率が47%と70%の時の群落放射率は0.974と0.973で、単葉の放射率(0.977)との差は0.003～0.004である。これらの測定時の土壌の放射率は0.955～0.966と考えられるため、群落放射率に単葉の放射率がより大きく影響している。なお、表Ⅲ-3においてダイズ畑は被覆率47%より70%の方が放射率が小さくなっているが測定誤差と思われる。

Casellesら(1988)はオレンジ園の放射率を測定し、オレンジの木と地面の割合が6:4で、オレンジ木の放射率が 0.985 ± 0.006 、土壌の放射率が 0.957 ± 0.006 の時、このオレンジ園の放射率は 0.98 ± 0.01 であったと報告している。すなわち、60%の被覆率のオレンジ園でも、オレンジ木の放射率に近い放射率を示している。

なお、Casellesら(1992)は空間に作物や樹木によって壁が形成されると、作物や樹木と空間で構成された場所の放射率は、被覆率の

みに比例しないことを計算している。また、Sobrinoら(1990)はオレンジ園の放射率は測定角度によってオレンジの木の放射率より大きくなることを報告している。これは作物や樹木の壁による多重反射があるためである。したがって、ダイズの被覆率が約60%になると放射率が大きくなることや、表Ⅲ-3に示されているように、77%被覆率のバレイショ畑の放射率(0.967)が単葉の放射率(0.965)より大きくなっていることは、多重反射の影響があるためと思われる。

(4) 土壌水分と群落放射率の関係

同じ被覆率で土壌水分が異なる時の群落放射率の測定結果を表Ⅲ-4に示す。

表Ⅲ-4 作物群落放射率と土壌含水比の関係

作物畑	放射率±標準偏差	含水比	被覆率
ダイズ	0.962±0.005	12%	86%
	0.977±0.003	28	〃
トウモロコシ	0.957±0.009	13	70
	0.976±0.002	30	〃
キャベツ	0.974±0.003	34	91
	0.988±0.003	40	〃
コムギ	0.979±0.004	19	47
	0.979±0.005	23	〃

表Ⅲ-4によると、ダイズ畑は土壌含水比10%の変化に対して放射率は0.009変化している。また、トウモロコシ畑は0.011/10%、キャベツ畑は0.023/10%である。ダイズ畑、トウモロコシ畑は土壌のみの水分変化に対する放射率の増加割合と近似である。すなわち、土壌水分の影響が群落放射率に影響していることが推察できる。なお、コムギの群落放射率が変化しなかった原因は土壌水分や放射率の測定誤差と思われる。

土壌水分の変化に伴って群落放射率も変化することは、土壌自体の放射率の変化が群落放射率に影響していると考えられる。しかし、土壌水分の変化が作物葉の放射率に変化を与え、これが群落放射率に影響していることも考えられるが、さらに研究する必要がある。

以上のことから土壌水分の増加は作物の被覆率が大きくても、群

落放射率に影響をおぼすといえる。

第4節 まとめ

本研究によって明らかになった群落放射率の特性は、①単葉の放射率が大きい畑の群落放射率は大きい値を示す。そのため、②作物体型の違いによる群落放射率への影響は小さいと予想できる。③被覆率が大きくなると群落放射率は急速に単葉の放射率に近くなるか、場合によっては単葉の放射率より大きくなる。④しかし、この場合も群落放射率は土壌水分の影響を受け、土壌水分が多くなると群落放射率も増加する。

さらに、土壌や作物葉の放射率について確認できたことは、⑤土壌の放射率は土壌水分と直線関係にある。⑥測定した6種類の作物葉の放射率は0.965～0.989の範囲にあった。⑦測定した6種類の作物葉のうち、バレイショ葉の放射率は小さく、イネ科のトウモロコシ葉、コムギ葉、エンバク葉の放射率は大きかった。⑧作物葉について測定角度と放射率の関係は、測定角約60°付近まで大きな変化はない。

窓領域の放射率は放射温度計や衛星データを利用する場合に必要である。しかし、いままで作物群落の放射率について測定した例は少ない。放射温度計を使用して群落表面温度を測定する場合、正しく放射率を設定しなければ測定誤差を生じる。たとえば、国産放射温度計の本体温度と測定表面温度が20℃の差があるとき、放射率を0.01間違えば測定誤差は約0.3℃になる(王ら, 1993)。この誤差は野外測定で天空からの長波放射がある時さらに大きくなるため、正しく放射率を設定する必要がある。

今回測定した作物葉の放射率は0.965～0.989の範囲で、平均は0.978であった(表Ⅲ-1参照)。また、Idsoら(1976)が測定した34種の植物単葉の放射率は0.938～0.995の範囲で、約62%の植物単葉の放射率は0.97～0.98の範囲に入る。さらに、Fuchsら(1966)はタバ

コ葉0.971, サヤマメ葉0.957の結果を得ている。Sobrinoら (1993) は, オレンジ木0.985と0.983, 緑草0.972の放射率を得ている。すなわち, 多くの作物葉の放射率は0.97~0.98の範囲に入ると考えて良い。

多くの放射温度計の放射率設定は小数点以下2桁である。したがって, 作物葉温の測定には, 放射率を0.97または0.98に設定すると, 大部分の作物葉の表面温度が小さな誤差で測定できる。

一方, 一般に土壌の放射率は作物葉の放射率より小さく, また土壌の種類による変動が大きい。今まで発表された砂や土壌は表Ⅲ-5に示すように0.893~0.968である。壤土や植壤土の放射率でも0.93~0.97の範囲である。したがって, 作物の群落放射率は被覆率に応じて作物葉の放射率に-0.05~+0.01程度加えた値に設定する必要がある。

表Ⅲ-5 土壌の放射率

土壌の種類	放射率	備 考
砂(Sand, Quartz)	0.914~0.928	Buettner ら (1965)
砂(Plainfield sand)	0.90~0.94	Fuchs ら (1968)
砂(Silica sand)	0.893, 0.894	Idso ら (1969)
砂(Superstition sand)	0.949~0.954	"
壤土(Adelanto Loam)	0.966, 0.967	"
壤土(Brown Loam)	0.925	Sobrino ら (1993)
植壤土(Clay loam)	0.955~0.958	王 ら
植土(Red clay)	0.957	Sobrino ら (1993)

今後, 多くの作物群落や森林の放射率を測定して, 放射温度計の放射率設定に基づく誤差を少なくする必要がある。

第Ⅳ章 群落表面温度の特徴

第 IV 章 群落表面温度の特徴

第 1 節 はじめに

群落表面は地上における熱的現象の作用面である。そのため群落表面温度は地上における熱的現象を解析する場合に重要である。最近、衛星から定常的に熱赤外放射を測定するようになった。これを使用して地表面温度を求め、その値から地上の種々な熱的現象が解明されつつある。特に、地球規模の解析には衛星データの使用が不可欠で、衛星熱赤外データによる地球規模のデータベースも整備されつつある。

しかし、衛星と同じような放射温度計で測定した地上の表面温度についての研究はほとんどなく、衛星データ解析の支障になっている。そのため地上で放射温度計によって畑や森林の群落表面温度を測定し、群落表面温度の特性および衛星データ利用のための基礎データを得ることを目的として解析を行った。

植生の上から放射温度計によって群落表面温度を測定すると、これは平面的な群落表面温度でなく、植物の葉温や地面温度が含まれた表面温度である。したがって、放射温度計による群落表面温度は、作物の種類、栽植方法、植物の被覆率など多くの要素の影響を受ける。今回の実験はこれらの影響を明らかにするため、4種類の作物と1種類の森林で測定を行った。

第 2 節 観測方法および解析方法

群落表面温度の測定は、1992年、1993年に北大農場の畑と苫小牧地方演習林のミズナラ、ハルニレ、ヤチダモなどの広葉樹林で行った。

2.1 畑の観測方法

(1) 測定畑の状態

1992年の測定は北大農場のダイズ畑， トウモロコシ畑， キャベツ畑の3か所で， 1993年の測定は北大農場のダイズ畑， トウモロコシ畑， バレイショ畑の3か所である． その状況および測定期間を表IV-1， 表IV-2に示す． また， 測定畑の状況を写真IV-1に示した．

表 IV -1 1992年の実験畑の状況および測定期間

区 分	ダイズ畑	トウモロコシ畑	キャベツ畑
品種名	極早生枝豆 サッポロミドリ	一代交配スイートコーン ハニーバンタム36	不 明 (苗を購入)
播種日	5月17日	5月21日	6月03日に移植
栽植密度	20cm×10cm (5/17～7/03) 20cm×20cm (7/04～7/24) 40cm×20cm (7/25～9/22)	45cm×30cm	50cm×50cm
圃場の広さ	11m×8.5m	9m×8m	9m×8m
測定期間	6月26日～9月21日	6月26日～9月21日	6月26日～9月11日

表 IV -2 1993年の実験畑の状況および測定期間

区 分	ダイズ畑	トウモロコシ畑	バレイショ
品種名	超極早生枝豆えぞにしき	一代交配スイートコーン ハニーバンタム36	男 爵
播種日	5月18日	5月14日	5月17日
栽植密度	25cm×25cm	40cm×30cm	40cm×30cm
圃場の広さ	18m×8m	11m×8.5m	9m×8m
測定期間	6月12日～8月27日	6月12日～8月27日	6月12日～8月22日

(2) 測定項目と方法

測定項目は群落表面温度， 気温， 純放射， 日射， 被覆率で， 使用した測定器および測定法は次のとおりである．

◎ 群落表面温度 : 放射温度計 (OPTEX HR-1P, 視野角度 2° , 波長範囲 $7 \sim 20 \mu m$)

測定法 : 地面上の2.0mの高さから天頂角約 45° でスキャン (首振り角 80°) , トウモロコシ畑は

生長に伴って高さを変化させた。

- ◎ 気 温 : 地面上約 1.5m, 熱電対通風温度計
- ◎ 純 放 射 : 地面上約 1.5m, 放射収支計(英弘精機製, F-11型)
- ◎ 日 射 : 地面上約 1.2m, 精密全天日射計(英弘精機製, MS-801型)
- ◎ 被 覆 率 : 地面上約 2.5mから写真を撮影し, スキャナで作物部分の面積を読み取り被覆率を求めた。

第Ⅱ章の研究で明かのように放射温度計の出力は本体温度の影響を受ける。放射温度計の本体温度の影響を少なくするために, 各放射温度計の本体にヒータを巻つけて, 温度制御器で30℃を保つようにした。また, 各放射温度計の出力の補正のため, 作物の群落表面温度の測定の他に, 天空からの長波放射の補正のため, 参照板(放射率0.96の塗料を塗布したアルミ板)の表面温度を放射温度計と熱電対で測定した。

また, 天空からの長波放射の補正は, 基準にした放射温度計と各畑で使用した放射温度計で参照板の表面温度を測定し, 熱電対で測定した参照板の表面温度との差について相関関係を求めて, その回帰式を補正式として利用した。

2.2 森林の観測方法

森林の測定は苫小牧地方演習林の山の神地区で行った。測定森林の樹種は広葉樹で樹高は約10mである。観測は13mのタワーを用い樹冠上約1.7mの高さから群落表面温度を測定した。群落表面温度以外に畑と同様に気温, 純放射, 日射を測定した。使用した測定器, 測定方法を以下に示す。また, 測定森林の状況を写真IV-2に示す。

- ◎ 群落表面温度 : 群落表面温度の測定方法は畑の場合とほとんど同じである。ただし, 参照板による補正を行っていないので, 室内検定で求めた回帰式を利用

して補正した。

- 表面温度計 : 放射温度計 (OPTEX HR-1P, 視野角度 2° , 波長範囲 $7 \sim 20 \mu m$)
- 測定法 : 樹冠上の $1.7m$ の高さから天頂角約 45° でスキャン (首振り角 80°)
- ◎ 気温 : 樹冠上約 $1.5m$, 熱電対通風温度計
- ◎ 純放射 : 樹冠上約 $1.2m$, 放射収支計 (英弘精機製, F-11型)
- ◎ 日射 : 樹冠上約 $2.0m$, 精密全天日射計 (英弘精機製, MS-801型)
- ◎ 被覆率の測定 : 森林の林床から上向きに写真を撮影し, スキャナで葉や樹木部分の面積を読み取り被覆率を求めた。

測定期間は1992年5月01日～10月31日である。

2.3 解析項目

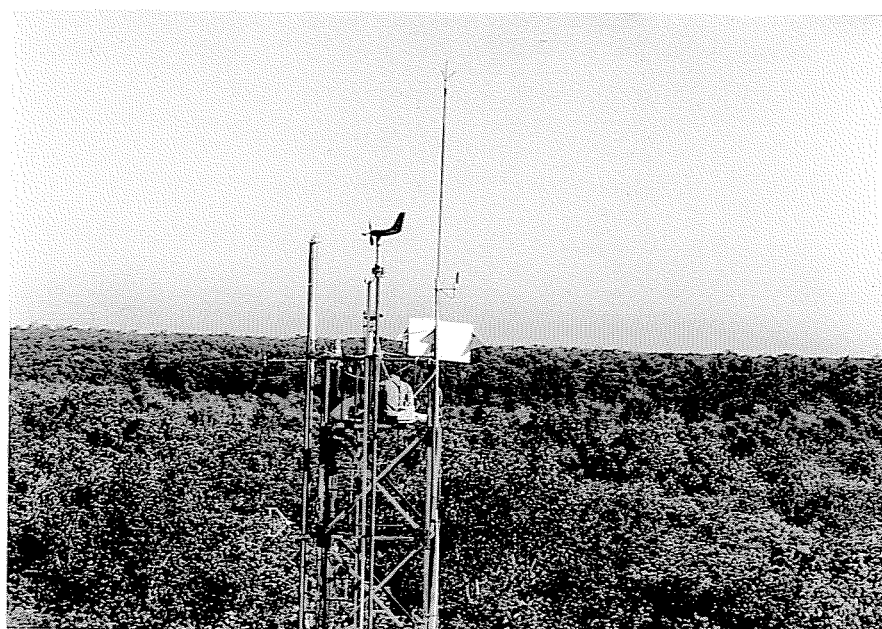
解析は畑や森林上から測定した群落表面温度の特徴, 群落表面温度と気温の関係などについて行った。

測定間隔は畑15分, 森林10分であるが, 放射温度計で測定した15分や10分間隔の群落表面温度ではバラツキが大きいため, 移動平均 (3回の測定の移動平均) を行ったデータについて解析した。また, 曇りの日のデータも変動が大きいため, 晴天日のデータについて解析を行った。解析は次の5項目である。

1. 測定期間中の畑, 森林の被覆率の推移
2. 群落表面温度と気温の日変化
3. 最高・最低群落表面温度と最高・最低気温の差
4. 作物別の最高・最低群落表面温度の比較
5. 群落表面温度の最高・最低値の出現時刻



写真Ⅳ-1 測定畑の状況



写真Ⅳ-2 測定森林の状況

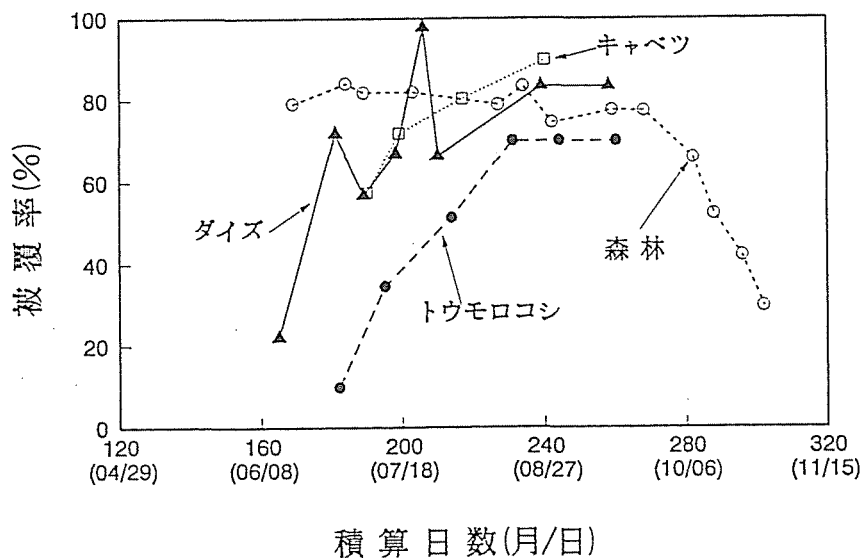
第3節 結果および考察

3.1 測定期間中の畑，森林の被覆率の推移

群落表面温度は被覆率の影響を受ける．そのため畑，森林の被覆率の推移を調べた．

(1) 1992年の畑，森林の被覆率の推移

図IV-1に測定期間中の畑，森林の被覆率の推移を示した．ダイズ畑は2回間引き(7月03日と7月24日)を行ったため，生育途中で被覆率の低下を示しているが，キャベツ畑とトウモロコシ畑の被覆率は8月中，下旬まで生育時期の経過と共に増加している．すなわち，キャベツ畑の被覆率は7月08日の57%から8月27日の90.0%へ，トウモロコシ畑の被覆率は6月30日の10.0%から8月18日の72.0%へ増加し，その後両畑の被覆率はほぼ変化していない．ダイズ畑の被覆率については，7月18日に最大の98.0%を示したが間引き後は66.4%になり，さらに8月27日には83.4%まで増加し，以後一定であった．



図IV-1 1992年の畑と森林の被覆率の推移

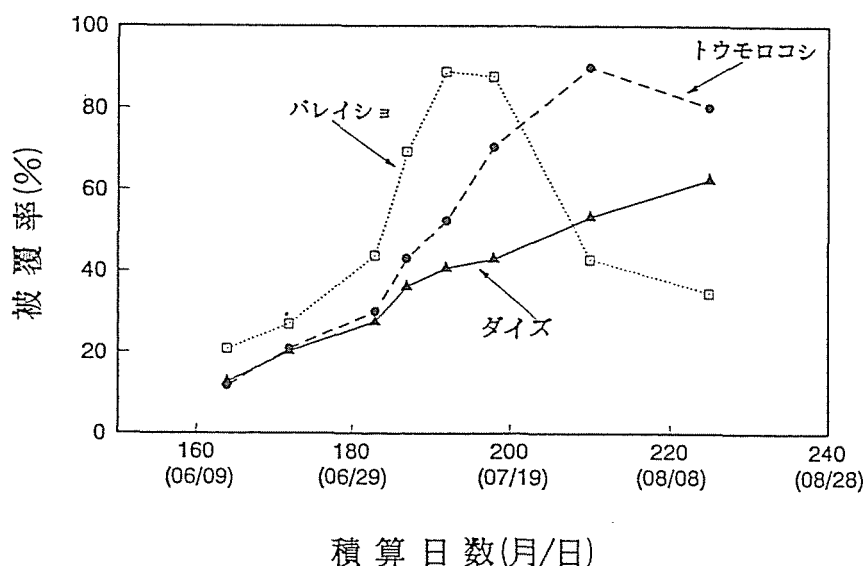
図IV-1に示されているように，トウモロコシ畑の最高の被覆率は

他の畑より低く，また生育時間中も他の畑より常に低い被覆率を示した．

これらの畑の被覆率の変化に対して，森林の被覆率は測定開始の6月17日から高い被覆率（75.0～83.0％）を示している．この高い被覆率は9月下旬まで続き，以後落葉のため低下している．

（2）1993年の畑の被覆率の推移

図IV-2に1993年における畑の被覆率の推移を示した．バレイショ畑の被覆率は7月中旬に最大値（88.9％）を示し，その後，地上部が枯死したため被覆率は減少した．トムモロコシ畑の被覆率は生育初期から7月末まで生育時期の経過と共に増加し最大被覆率90.0％を示したが，その後，やや低下した．ダイズ畑の被覆率は生育初期から8月中旬まで増加しているが，その増加率は小さく1992年と異なった被覆率の推移を示している．これは1993年7，8月が低温，小雨のためダイズの生育が充分でなかったためである．



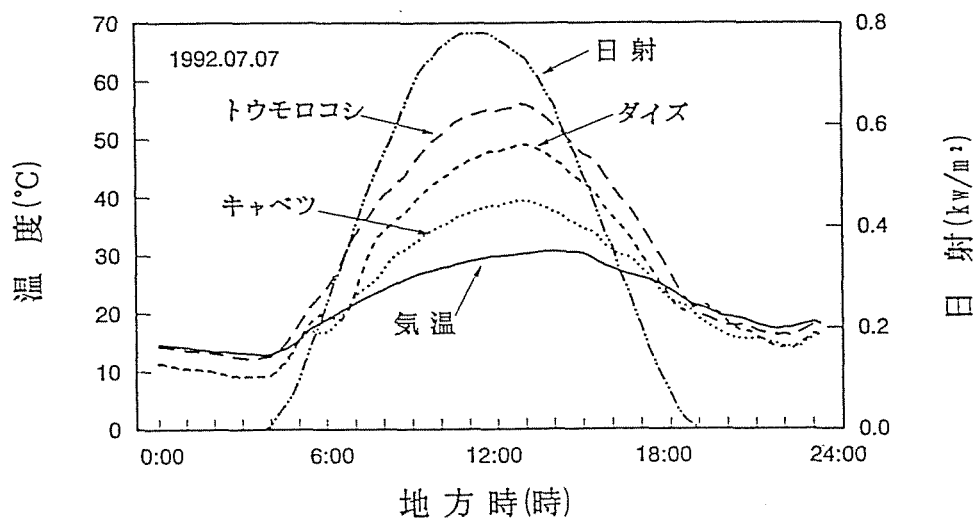
図IV-2 1993年の畑の被覆率の推移

1992年と1993年の畑の被覆率の推移を比較すると，1992年はダイズ畑の被覆率がトムモロコシ畑の被覆率より常に高いのに対して，1993年はダイズ畑の被覆率がトムモロコシ畑の被覆率より常に低い．

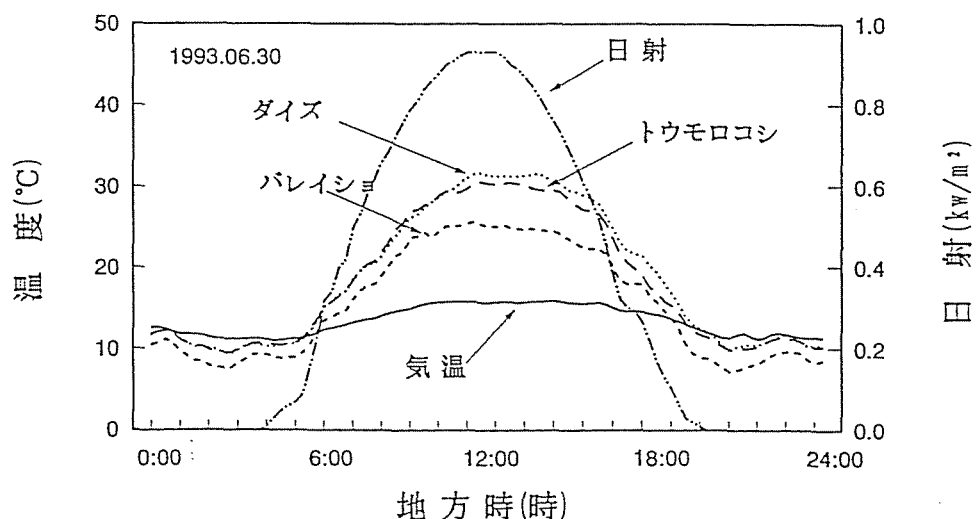
3.2 群落表面温度と気温の日変化

畑について群落の表面温度と気温の日変化を比較した。

1992年の典型的な快晴日(1992年7月07日)における畑の群落表面温度，気温および日射の日変化の例を図IV-3に示した。図IV-3によると，日中の畑の群落表面温度は気温より高く，夜間は気温より低くなっている。また，畑によって群落表面温度は異なり，トウモロコシ畑が最も高く，ついでダイズ畑，キャベツ畑の順である。日中



図IV-3 畑における群落表面温度，気温および日射の変化
(1992年 快晴日の例)



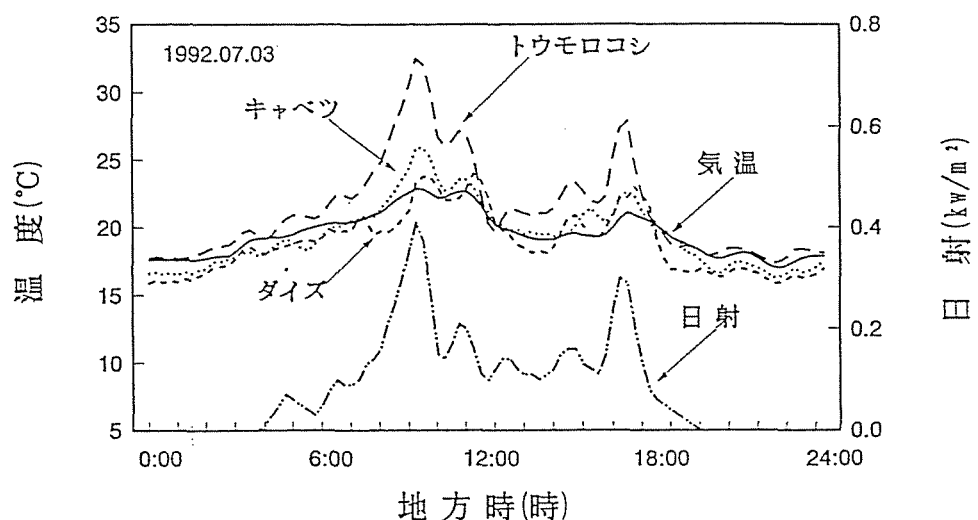
図IV-4 畑における群落表面温度，気温および日射の変化
(1993年 快晴日の例)

の群落表面温度は作物の被覆率にも影響を受けるが，7月07日の各作物の被覆率はダイズ畑が57.0%，キャベツ畑が57.6%，トウモロコシ畑が23.3%で，トウモロコシ畑の被覆率が最も小さかった．

1993年についても典型的な快晴日(1993年6月30日)における畑の群落表面温度，気温および日射の変化を比較した(図IV-4)．図IV-4によると日中の畑の群落表面温度は気温より高く，夜間は気温より低くなっている傾向は1992年と同じである．しかし，1993年はダイズ畑の群落表面温度が最も高く，バレイショ畑の群落表面温度が最も低かった．この日の各作物の被覆率はダイズが26.3%，トウモロコシが28.4%，バレイショが40.8%で，ダイズ畑の被覆率が最も小さかった．

日射の影響が少ない曇天の例(1992年7月03日，1993年7月21日)についても調べてみた(図IV-5，図IV-6)．図IV-5，6によると曇天の群落表面温度の一日の変化傾向は晴天と似ているが，日中の群落表面温度と気温の差が小さい．

畑の日中は群落表面温度が気温より高く，夜間には気温より低い状態が，観測期間中一般に見られた現象である．これは日中には作物葉が日射の影響で気温より高くなり，夜間は作物葉が放熱面になるため気温より低くなるためである．



図IV-5 畑における群落表面温度，気温および日射の変化
(1992年 曇天の例)

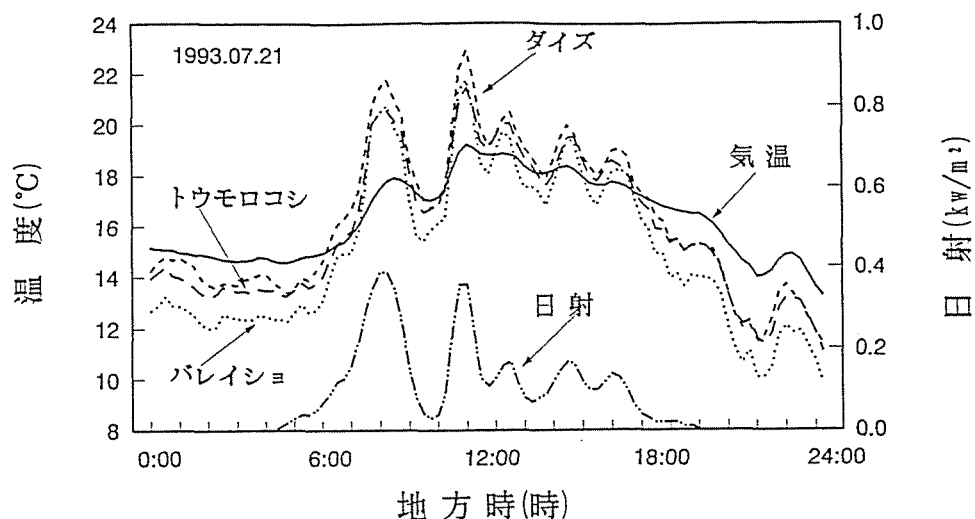


図 IV -6 畑における群落表面温度，気温および日射の変化
(1993年 曇天の例)

また，図 IV -3，4によると最高群落表面温度の出現時刻は気温の最高値より早く現れているが，最低群落表面温度の出現時刻は気温の最低値の出現時刻と大きな差がない。

森林についても典型的な快晴日の1992年6月28日の群落表面温度，気温および日射の日変化を図 IV -7に示した。この時の森林の被覆率は75.0%であった。畑と同様に日中の群落表面温度は気温より高く，夜間は気温より低い。また，最高群落表面温度や最低群落表面温度の出現時刻も畑と同様な状態を示しているように見える。しかし，曇天(1992年7月13日)の一日の変化(図 IV -8)を見ると，曇天の群落表面温度は一日中気温より低かった。

作物の被覆率が大きくなると群落表面温度は作物の葉温に近い変化を示し，被覆率が小さいと地面温度に近い変化を示すことは容易に想像できる。葉温については，武智(1968，1969)は日中の葉温は気温より高く，夜間は低いことを報告している。また，Linacre(1963)も多くの研究者の結果をまとめ，良く灌漑された圃場の作物の葉温は気温より高くなることを報告している。

さらに，放射温度計で測定した作物の群落表面温度について，Tanner(1963)は日中のアルファルファの群落表面温度は気温より5

～10℃高く、夜間は5～10℃低いと報告している。

しかし、奥山(1975)は水稻の群落表面温度を放射温度計で測定して、日中の群落表面温度が気温より低いと報告している。また、Bladら(1976)や Penningtonら(1989)は日中の群落表面温度が気温より高いことも低いこともあることを報告している。しかし、一般に日射がある場合は群落表面温度が気温より高い観測例が多い。

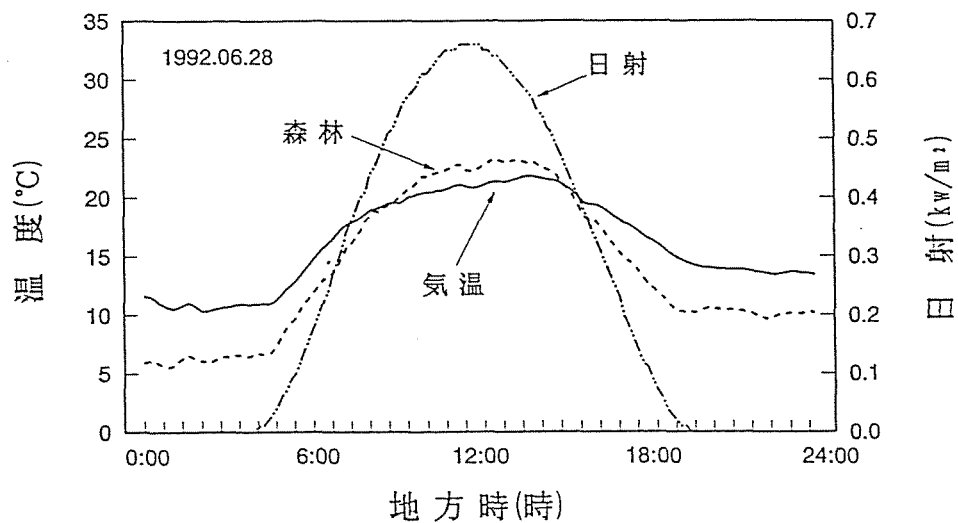


図 IV - 7 森林における群落表面温度，気温および日射の変化
(1992年 快晴日の例)

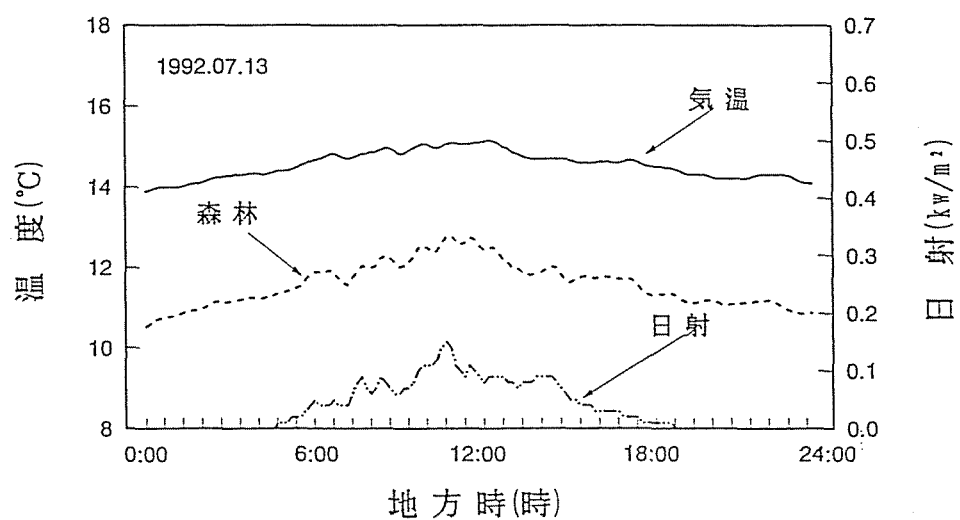


図 IV - 8 森林における群落表面温度，気温および日射の変化
(1993年 曇天の例)

3.3 最高・最低群落表面温度と最高・最低気温の差

(1) 畑の最高・最低群落表面温度と最高・最低気温の差

一般に日射がある場合は群落表面温度は気温より高く、夜間は気温より低い観測例が多いため、最高・最低群落表面温度と最高・最低気温の差を調べた。

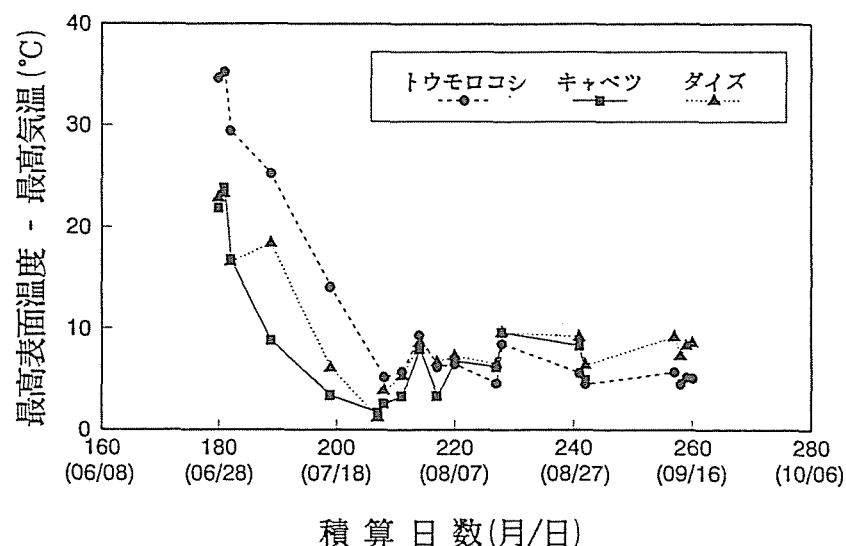


図 IV - 9 畑における最高群落表面温度と最高気温の差の推移(1992年)

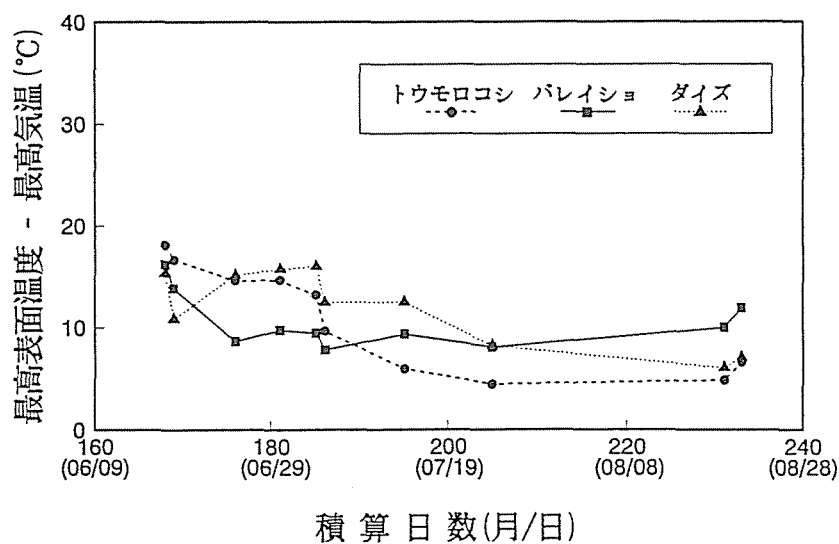


図 IV - 10 畑における最高群落表面温度と最高気温の差の推移(1993年)

1992年の最高・最低温度について群落表面温度と気温の差を調べた。図IV-9に群落表面温度と気温の最高値の差について、生育期間中の変化を示した。生育初期には大きな温度差を示すが、1992年7月28日(210日)頃から以降はほぼ 10°C 以下の範囲で変動している。生育初期には群落表面温度は主に地面を測定しているため、このような大きな温度差を示したものと思われる。1993年の場合は7月19日(200日)以降は、バレイショを除いて温度差はほぼ 10°C 以下で1992年と同様であるが、生育初期には1993年のような大きな温度差は見られなかった。これは、1993年は天候が不順で、晴天の日が少なかったことに原因があるものと思われる。バレイショは7月19日(200日)以降は被覆率が低下しているため温度差は大きくなっている(図IV-10)。

葉温の場合でも葉気温差が時には 20°C になることもあったと武智(1968)は報告している。1992年7月28日(210日)以降の最高群落表面温度と最高気温の差の平均値は、トウモロコシ畑 6.0°C 、キャベツ畑 6.3°C 、ダイズ畑 7.8°C であった。また、1993年7月14日(195日)以降の最高群落表面温度と最高気温の差の平均値は、トウモロコシ畑 5.5°C 、バレイショ畑 9.8°C 、ダイズ畑 8.5°C であった。これら値はTanner(1963)の発表したアルファルファの日中の群落表面温度と気温の差の $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ の範囲であり、また武智(1968)が報告している草本作物の葉気温差である 5°C 以上とも一致する。

最低温度についても気温と群落表面温度の差を調べた(図IV-11, 12)。最低温度の場合は最高温度より温度差が小さい。しかし、1992年は最高温度の場合と同様に生育初期には温度差が大きい傾向は同じである。1993年は晴天の日が少なくこのような現象は明確でない。1992年7月28日(210日)以降の最低群落表面温度と最低気温の差の平均は、トウモロコシ畑 -0.9°C 、キャベツ畑 -2.3°C 、ダイズ畑 -1.2°C であった。また、1993年7月14日(195日)以降の最低群落表面温度と最低気温の差の平均値は、トウモロコシ畑 -2.0°C 、バレイショ -3.1°C 、ダイズ畑 -2.1°C であった。

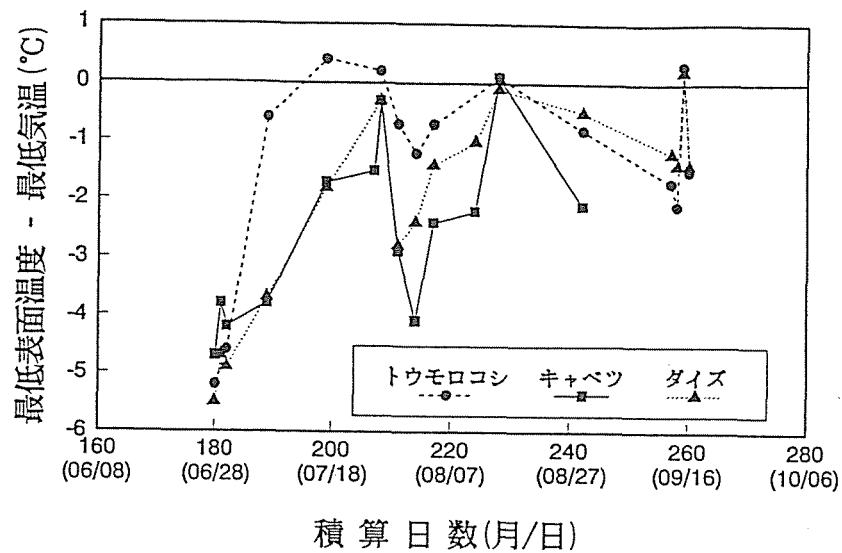


図 IV -11 畑における最低群落表面温度と最低気温の差の推移 (1992年)

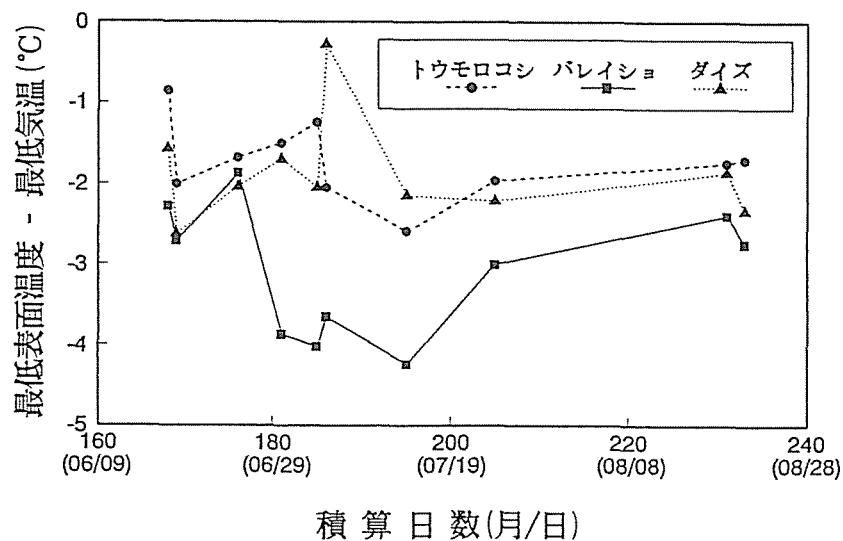


図 IV -12 畑における最低群落表面温度と最低気温の差の推移 (1993年)

Tanner(1963)はアルファルファの夜間の温度差は $-5\sim-10^{\circ}\text{C}$ であると報告しているが、今回はこのような大きな温度差は観測されなかった。

平均温度についても気温と群落表面温度の差を調べた(図 IV -13, 14)。その結果は最高群落表面温度の傾向とほぼ同じである。

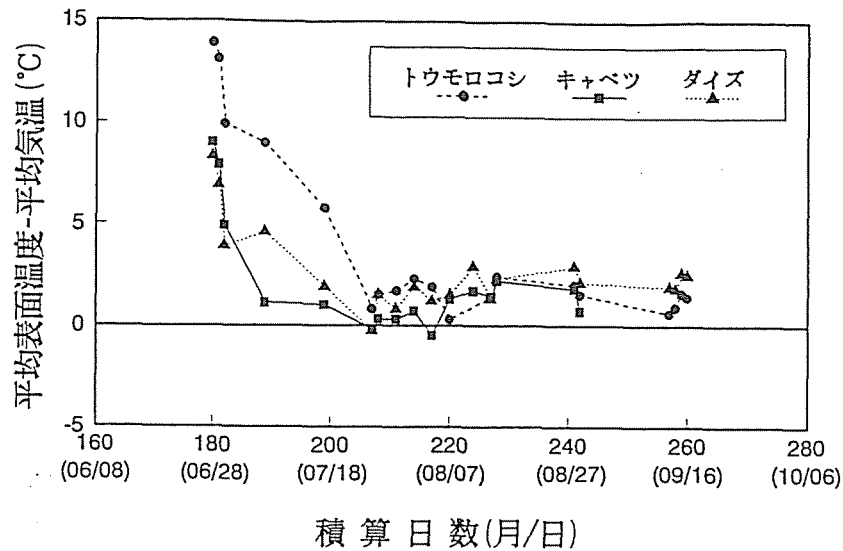


図 IV -13 畑における平均群落表面温度と
平均気温の差の推移 (1992年)

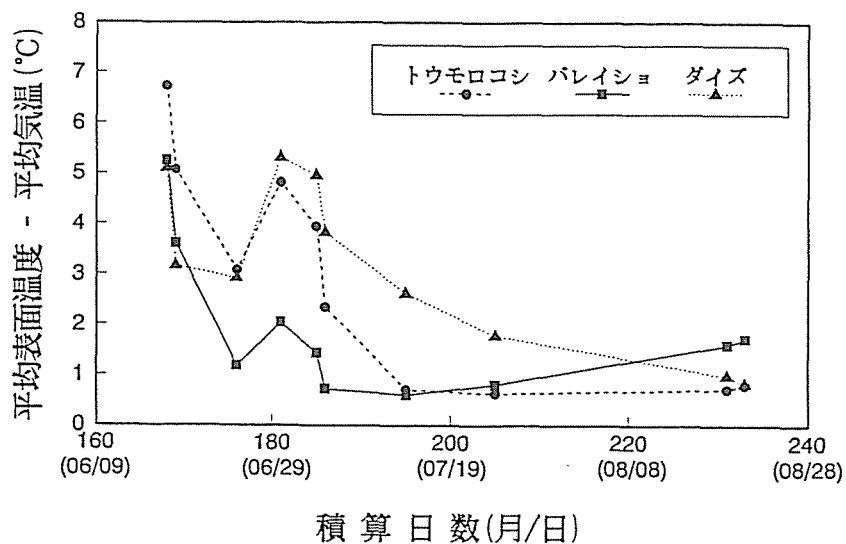


図 IV -14 畑における平均群落表面温度と
平均気温の差の推移 (1993年)

(2) 森林の最高・最低群落表面温度と最高・最低気温の差

晴天日の森林についても最高・最低・平均温度の群落表面温度と気温の差を調べた。1992年の群落最高温度についての結果を図 IV -15に示した。1992年5月19日(140日)以前には気温との差が大きいですが、6月28日(180日)から9月16日(250日)までは+1.3℃を中心に変動している。また9月26日(270日)以降は温度差が逆転して気温の最高値の

方が高くなる場合が多い。この気温の最高値の方が群落表面温度の最高値より高くなる時期は、図 IV-1 に示したように落葉によって被覆率が低下してきた時期に対応している。この時期の気温はまだ樹冠付近の温度に大きく影響を受けるが、測定群落表面温度は樹冠の下の日陰部分の温度を含んでいるためと思われる。

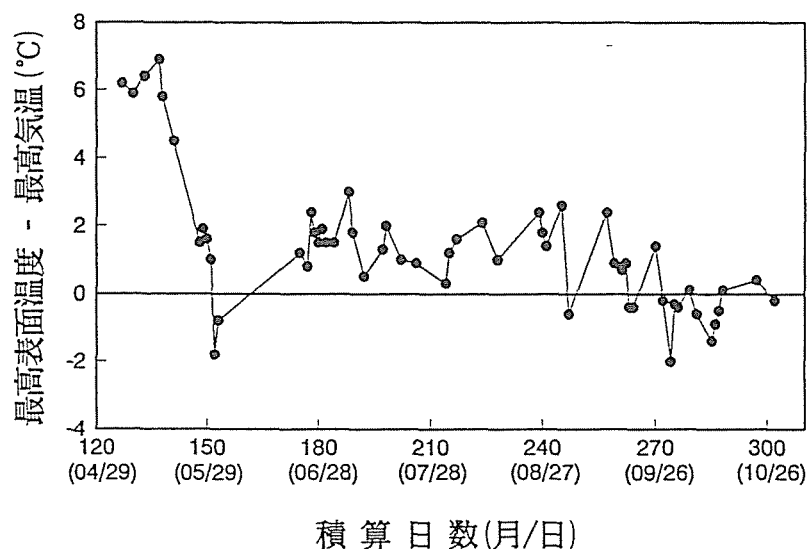


図 IV-15 森林における最高群落表面温度と最高気温の差の推移(1992年)

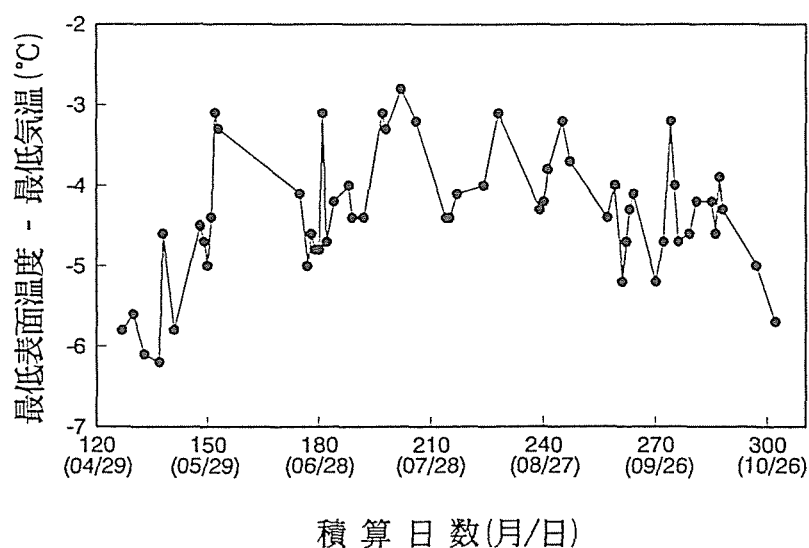


図 IV-16 森林における最低群落表面温度と最低気温の差の推移(1992年)

最低温度についても群落表面温度と気温の差を調べた(図 IV-16). 温度差の傾向は山型を示し, 被覆率が小さい春と秋に温度差が大きくなる傾向を示した. これは被覆率が小さいときには放熱型の気温分布(高さが高いほど気温が高い)を示し, 放熱面は主に地面で温度が最も低く, 気温の測定高さ(地上11.5m)と大きく異なるためである.

1992年の平均群落表面温度について調べた結果を図 IV-17に示した. 平均群落表面温度の差は8月末まで大きな変化がない. 9月に入ると差が大きくなった. これは9月に入って日射が弱くなる一方晴冷のため群落表面温度が低くなるためと思われる.

このような森林の群落表面温度と気温の差についての季節的変化の研究は今まで見あたらない.

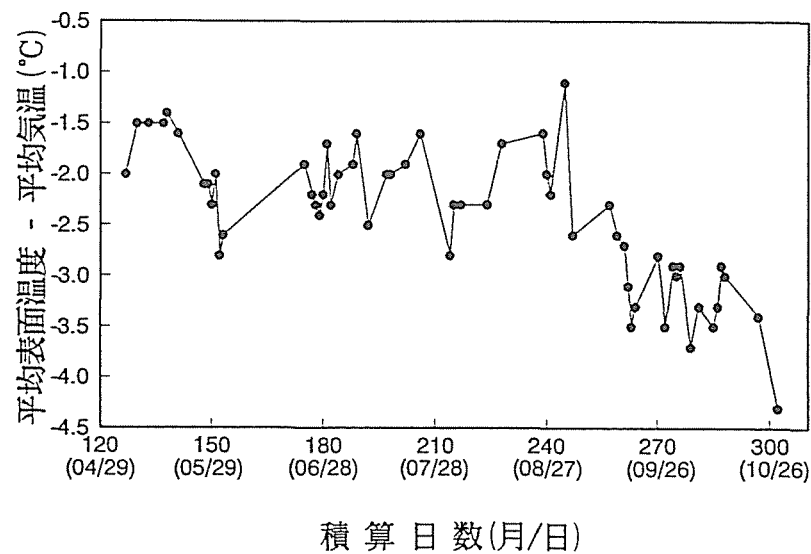


図 IV-17 森林における平均群落表面温度と
平均気温の差の推移(1992年)

3.4 作物群落別の最高・最低群落表面温度の比較

(1) 作物群落別の最高群落表面温度の比較

作物群落の表面温度は作物の被覆率や生育時期によって異なることが予想できる. そのため作物群落の特徴が最も顕著に現れる最高・最低群落表面温度と被覆率や生育時期の関係を解析した.

1992年の晴天日について、最高群落表面温度の平均を調べた。晴天日(最高温度の出現時刻が11~14時の時)はダイズ畑19日分、キャベツ畑15日分、トウモロコシ畑18日分のデータ(計52日分)が得られた。これらの日のうち、3種類の作物ともデータがある14日分の平均値を計算した結果、最高群落表面温度の平均はダイズ畑36.5℃、キャベツ畑34.9℃、トウモロコシ畑39.6℃で、トウモロコシ畑が最も高く、ついでダイズ畑、キャベツ畑の順である。しかし、図IV-1に示したように1992年のトウモロコシ畑は他の畑より常に被覆率が低く、上から放射温度計で群落表面温度を測定した場合、地面の温度を測定する比率が高い。したがって、被覆率が最大に近い1992年8月29日(242日)の最高群落表面温度を比較すると、ダイズ畑(被覆率約83.0%)で30.9℃、キャベツ畑(被覆率約90.0%)で29.4℃、トウモロコシ畑(被覆率約70.0%)で29.0℃で、被覆率の最も小さいトウモロコシ畑が最高群落表面温度が最も低い。そのため生育時期別に晴天日の最高群落表面温度の平均を調べた。各生育時期の晴天日は4日である。

その結果を図IV-18に示した。図IV-18によると6月28日~7月01日(晴天日は6月28日、6月29日、6月30日、7月01日)と7月07日~7月26日(晴天日は7月07日、7月17日、7月25日、7月26日)には、トウモロコシ畑は他の畑より高い最高群落表面温度を示している。また、7月下旬から8月上旬の晴天日の4日間(7月29日、8月01日、8月04日、8月07日)について最高群落表面温度の平均を計算すると、ダイズ畑31.7℃、キャベツ畑30.1℃、トウモロコシ畑31.6℃で、トウモロコシ畑とダイズ畑はほぼ同じ最高群落表面温度であった。しかし、8月中旬以降の晴天日の4日間(8月14日、8月15日、8月28日、8月29日)の最高群落表面温度の平均は、ダイズ畑32.5℃、キャベツ畑31.9℃、トウモロコシ畑30.4℃で、トウモロコシ畑が最も低い。

1993年についても畑別の最高群落表面温度を比較した。1993年は夏季の気温が低温で天気が異常であったため、3種類の畑で晴天日は12日分ずつしか取れなかった。この12日間の最高群落表面温度の

平均はダイズ畑 34.4℃， トウモロコシ畑 33.1℃， バレイショ畑 33.0℃で，ダイズ畑が最も高く，次いでトウモロコシ畑，バレイショ畑の順である。

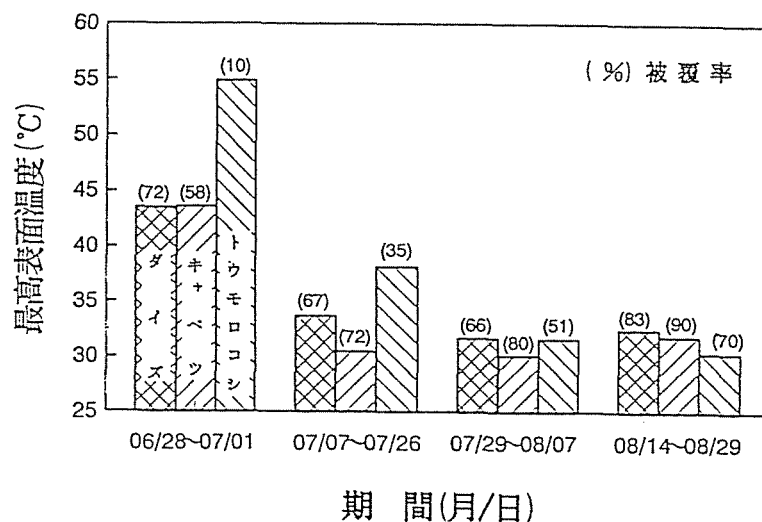


図 IV -18 畑における各生育時期の最高群落表面温度の比較(1992)

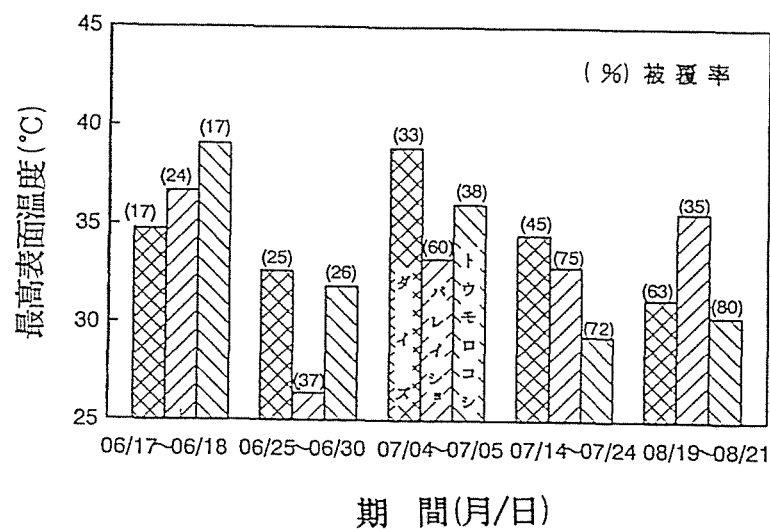


図 IV -19 畑における各生育時期の最高群落表面温度の比較(1993)

しかし，図 IV -2に示したようにダイズ畑の被覆率は他の畑より常に被覆率が低く，1992年トウモロコシ畑の被覆率の状況と似ている。

生育時期別の2日間の晴天日の最高群落表面温度の平均を調べた結果を図IV-19に示した。図IV-19によると1993年6月17日と18日にはトウモロコシ畑は他の畑より高い最高群落表面温度を示している。また、1993年6月25日と30日、1993年7月04日と05日および1993年7月14日と24日について、ダイズ畑は他の畑より高い最高群落表面温度を示している。しかし、生育後期の1993年8月19日と8月21日の最高群落表面温度の平均は、バレイショ畑35.6℃、ダイズ畑31.3℃、トウモロコシ畑30.4℃で、トウモロコシ畑が最も低くかった。この傾向も1992年の測定結果と一致している。

すなわち、トウモロコシ畑は生育初期には高い最高群落表面温度を示すが、生育後期にはダイズ畑、キャベツ畑、バレイショ畑より低い温度を示している。これはトウモロコシが生長して草丈が高くなると、上から群落表面温度を測定した場合、群落内部の日陰部分の低い作物温度も測定されるためと思われる。

また、1992年のダイズ畑は途中間引き(7月03日、7月24日)しているが、ダイズ畑とキャベツ畑の最高群落表面温度を比較すると、キャベツ畑の方がダイズ畑より常に低い。これはキャベツ畑の被覆率がダイズ畑の被覆率より一時期を除いて高いことも一因と思われる。また、1993年の生育後期のバレイショ畑が他の畑より特に高いのは地上部が枯死して被覆率が低下したためである。

(2) 作物群落別の最低群落表面温度の比較

最低群落表面温度についても晴天日の平均を調べた。その結果、1992年は晴天日の最低群落表面温度の平均はダイズ畑11.7℃、キャベツ畑12.4℃、トウモロコシ畑12.5℃で、トウモロコシ畑とキャベツ畑が高く、ダイズ畑が低い。最高群落表面温度と同じように時期別に4日間の最低群落表面温度を調べると、図IV-20に示すようにトウモロコシ畑はキャベツ畑より全期間を通じて常に高い。また、1992年6月28日～7月01日はトウモロコシ畑はダイズ畑やキャベツ畑より最低群落表面温度は高いが、8月14日～8月29日にはトウモロコ

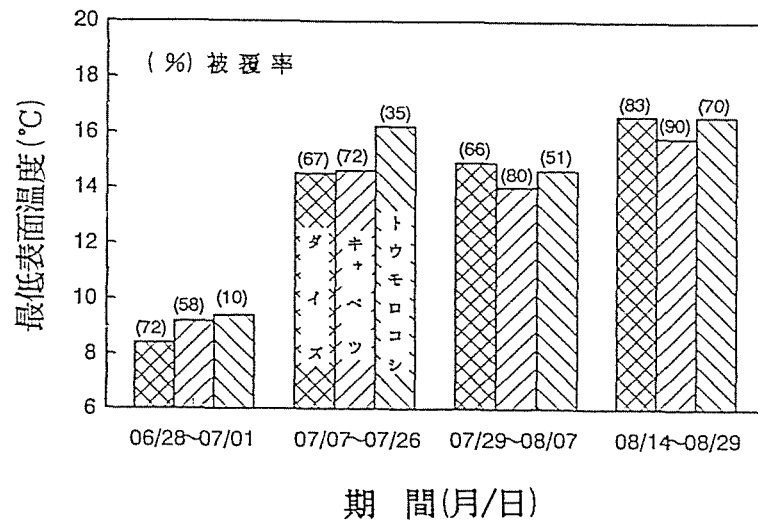


図 IV - 20 畑における各生育時期の最低
群落表面温度の比較 (1992)

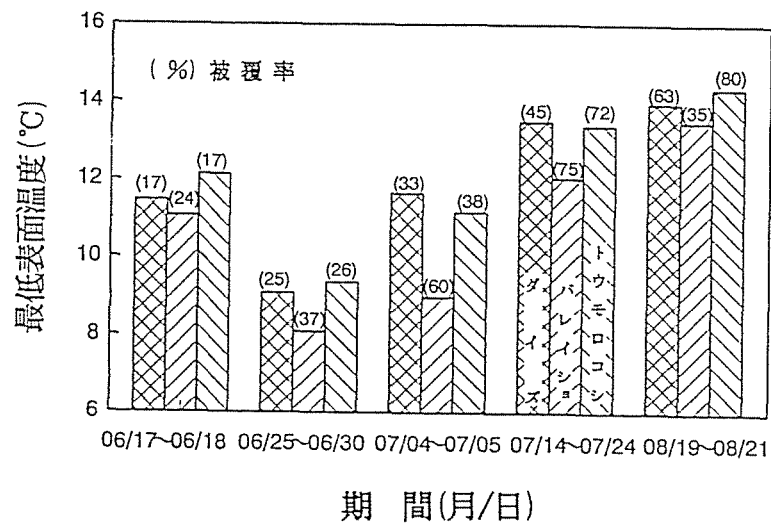


図 IV - 21 畑における各生育時期の最低
群落表面温度の比較 (1993)

シ畑とダイズ畑は同じような最低群落表面温度を示している。

1993年の最低群落表面温度について1992年と同じように晴天日の平均値を調べた。最低群落表面温度の平均はダイズ畑11.9℃、バレイショ畑10.7℃、トウモロコシ畑12.1℃で、トウモロコシ畑はダイズ畑より最低群落表面温度が高いことについて1992年と一致してい

る。時期別の2日間の最低群落表面温度を調べると、図IV-21に示すようにトウモロコシ畑とダイズ畑はバレイショ畑より全期間を通じて高い。トウモロコシ畑とダイズ畑を比べると、トウモロコシ畑は前期と後期に高い最低群落表面温度を示した。

以上のように、群落の状態による最高群落表面温度の特徴と最低群落表面温度の特徴は異なるといえる。また、群落の状態によって時期別に最高・最低群落表面温度が異なる。トウモロコシは草丈が高くなるため畝間や株間を広くしなければならない。そのため生育初期のトウモロコシは草丈の低い作物よりも被覆率は小さい。しかし、生育後期のトウモロコシはダイズ、キャベツ、バレイショなどと比較して群落の上層部に植生が多くないため、上から放射温度計で測定すると、群落内部の日陰部分の作物温度も測定することになる。したがって、最高群落表面温度については生育初期に他の群落より高いが、生育後期には他の群落より低くなる。

また、最低群落表面温度については、トウモロコシ畑は生育初期には被覆率が小さいため、地面温度を多く測定することになる。夜間には地中から熱が上昇するため、地面温度は作物葉温より高い。そのため、被覆率が小さいトウモロコシ畑は、他の畑より高い最低群落表面温度を示す。しかし、生育後期には葉が繁茂するため作物葉を多く測定することになり、地面の熱容量より作物葉の熱容量に主に関係すると思われる。したがって、作物葉の熱容量は作物間の差が小さいと推定できるため、トウモロコシ畑の最低群落表面温度は他の畑と同じような群落表面温度を示すと考えられる。

群落構造と群落表面温度の研究は今まで多くなく、Heilmanら(1981)がオオムギについて、被覆率と群落表面温度の関係式を導き出しているのみで、異なった作物間の比較はなされていない。

3.5 群落表面温度の最高・最低値の出現時刻

最高・最低群落表面温度の出現時刻は植生状態と関係するため重

要である。晴天日の最高・最低群落表面温度の出現時刻を調べた。

図 IV-3 に示した 1 日快晴であった 1992 年 7 月 07 日のダイズ畑、キャベツ畑、トウモロコシ畑の最高群落表面温度の出現時刻は共に 13 時 10 分であった。この日の南中時は 11 時 39 分で日射量が最大であった時間は 11 時 55 分であり、日射量の最大時間より最高群落表面温度は 1 時間 15 分遅れて現れている。気温の最高温度は 14 時 10 分に現れており、最高群落表面温度の出現時刻より約 1 時間遅い。なお、1992 年 7 月 07 日の 11 時から 14 時までの平均風速（測定高度 6.5 m）は 2.3 m/s で、風速は強い方でなかった。

また、最低群落表面温度の出現時刻はダイズ畑とキャベツ畑 03 時 25 分、トウモロコシ畑 03 時 40 分で、最低気温は 04 時 10 分に出現している。最低群落表面温度の出現時刻は日の出時間（04 時 03 分）より 23 分～38 分早い。

図 IV-3 に示したように群落表面温度と気温の最高・最低温度の出現時刻に大きな差がみられたため、晴天日について最高群落表面温度と最高気温の出現時刻を調べた。1992 年の晴天日は℃で用いたダイズ畑 19 日分、キャベツ畑 15 日分、トウモロコシ畑 18 日分および森林 54 日分のデータである。この晴天日のうち、最高群落表面温度が最高気温より早く現れた日数は、ダイズ畑で 12 日（63%）、キャベツ畑で 8 日（53%）、トウモロコシ畑で 9 日（50%）、森林で 30 日（56%）であった。また、同時間の場合も、ダイズ畑で 5 日（26%）、キャベツ畑で 6 日（40%）、トウモロコシ畑で 6 日（33%）、森林で 15 日（28%）であった。しかし、最高群落表面温度が最高気温より遅れた日もあったが、畑において 1～3 日（7～17%）、森林で 9 日（17%）であった。すなわち、全般的に最高群落表面温度は 1992 年 7 月 07 日と同様に最高気温より早く現れる傾向にあった。

また、最低温度についても調べた。最低群落表面温度が最低気温より早く現れた日数はダイズ畑で 9 日（47%）、キャベツ畑で 6 日（40%）、トウモロコシ畑で 9 日（50%）、森林で 21 日（41%）であった。また同時間の場合、ダイズ畑で 4 日（21%）、キャベツ畑で 5 日（33%）、

トウモロコシ畑で1日(6%), 森林で22日(43%)で, 最低群落表面温度が最低気温より遅いのは, 畑において2~5日(27~44%)で, 森林で8日(16%)であった。すなわち, 最低群落表面温度は最低気温と同時間, または早く現れる傾向にある。

晴天日について群落表面温度と気温の最高・最低値の出現時刻の差を計算した。その平均値を表IV-3に示す。キャベツ畑を除いて最高群落表面温度より最低群落表面温度の方が気温の極値に近い時間に出現する。これらの出現時刻の差は被覆率が大きくなると小さくなる傾向が見られたが, データ数が少なく確定できなかった。

表 IV -3 群落表面温度と気温の最高・最低値の
出現時刻(分)の差

	トウモロコシ	キャベツ	ダイズ	森林
最高値	20	28	34	36
最低値	7	35	19	14

注: 気温の出現時刻-群落表面温度の出現時刻

なお, 畑における観測期間中の晴天日の最高群落表面温度の出現時刻は3つの作物平均で11時48分, 最高気温の出現時刻は12時18分であった。また, 最低群落表面温度の出現時刻の全平均は03時00~30分で, 最低気温の出現時刻は03時36分であった。また, 森林の場合は, 最高群落表面温度の出現時刻の平均は12時01分, 最高気温の出現時刻は12時37分であった。最低群落表面温度については出現時刻の平均は03時23分で, 最低気温は03時37分であった。

以上のことから次のように要約できる。

- ① 群落表面温度の最高値の出現時刻は気温の最高値の出現時刻より約20~36分早い。
- ② 作物間ではトウモロコシ畑が最も気温の出現時刻に近い(20分早い)。
- ③ 群落表面温度の最低温度の出現時刻も気温の最低温度の出現時刻より早い。
- ④ その程度は表面状態によるバラツキが大きい。最高温度の出現時刻の差より小さい。
- ⑤ 作物間で

は最高群落表面温度と同様に，トウモロコシ畑が最も気温の出現時刻に近い(7分早い)。

第4節 まとめ

この研究によって，①畑と森林の群落表面温度の最高値は気温の最高値より高いこと，また群落表面温度の最低値は気温の最低値より低いことが確認された。これは熱収支の作用面が群落表面であることと畑と森林の表面の熱容量が比較的小さいことが関係していると思われる。すなわち，畑や森林の表面は日射によって直接的に暖められるため，日射量の最大となる時刻近くに群落表面温度が最高値を示す。しかし，植生の状態によって若干の遅れが生ずることは予想され，この遅れが植生状態と関係するため群落表面温度にとって重要であると思われる。②今回の測定ではトウモロコシ畑の最高・最低群落表面温度の出現時刻は遅く，気温の最高・最低温度の出現時刻に近かった。これはトウモロコシの植生状態によるものと思われる。すなわち，トウモロコシは直立性(垂直分布型)の草生を示しているため，日射が群落の内部まで入り熱の作用面が平面的でないためと思われる。すなわち，群落表面温度からみた場合，群落としての熱容量が大きいといえる。その結果，夜間において最低群落表面温度の出現時刻が遅くなり，結果的に気温の最低値に近い時間に最低群落表面温度が出現する。

さらに，生育时期的にもトウモロコシ畑は他の畑と比較して特徴が見られた。すなわち，③最高群落表面温度，最低群落表面温度とも生育初期には他の作物より高い傾向が見られた。これはトウモロコシ畑は株間や畦間が広いため，放射温度計で測定した場合，地面部分を多く測定しているためである。また，④生育後期には最高群落表面温度は他の作物より低く，最低群落表面温度は他の作物と同じような温度を示した。これは夜間の放熱がトウモロコシ畑と他の

作物では変わりなく，作物葉が放熱面であるためである．このように群落表面温度は作物の群落構造の影響を受ける．

第 V 章 作物群落の構造と群落表面温度の関係

第 V 章 作物群落の構造と 群落表面温度の関係

第 1 節 はじめに

前章でトウモロコシ畑とダイズ畑ではそれぞれの作物の形態が異なり、これが作物群落の表面温度に影響していることが判明した。そのため作物形態や群落構造と表面温度の関係を調べた。

De Wit(1965)は、作物群落の構造を5つのグループに分けている。すなわち、平坦分布型(代表的な作物は白クローバー、バレイショ、ダイズ)、垂直分布型(代表的な作物はトウモロコシ、ライムギ)、斜行分布型(代表的な作物はビート、ナタネ)、特殊分布型(代表的な作物はまだ提出しない)、ランダム分布型(多くの樹木)である。

これらの群落構造と光合成との関係については多くの研究結果があるが、群落表面温度との関係の研究はほとんどない。今回、観測に使用したトウモロコシとダイズは垂直分布型と水平分布型に属する作物である。トウモロコシ畑とダイズ畑について作物形態や作物群落の構造を調べ、表面温度との関係を観測した。

第 2 節 観測方法および解析方法

測定項目は、作物群落の構造、群落の構造による表面温度の相違である。

作物群落の構造については、第IV章で測定したトウモロコシ畑とダイズ畑において、①バイオマス(生体重)の高さ別割合、②作物被覆率の高さ別割合(天空に面している葉の高さ別割合)、③方向別な葉数、について調査した。群落の構造による表面温度の違いについては、上記のトウモロコシ畑とダイズ畑とは別に近接して栽植したトウモロコシとダイズについて、①作物の種類別の葉の表面温度の違い、②方向別の葉の表面温度について測定し、③群落の気温分布と群落表面温度について第IV章のトウモロコシ畑とダイズ畑で

調査した。

2.1 作物群落の構造

(1) バイオマス(生体重)の高さ別割合

バイオマスの高さ別割合は群落構造の指標となる。そのためトゥモロコシ畑とダイズ畑において、面積1㎡の株を切り取って、高さ別なバイオマス(生体重)を調べた。トゥモロコシは測定時の草丈が165cmであったので、地面から0～30cm、31～60cm、61～90cm、91～120cm、121～165cmの5つの層に分けて各層のバイオマスを調べた。ダイズについては測定時の草丈が70cmであったので、0～15cm、16～30cm、31～45cm、46～70cmの4つの層に分けて、各層のバイオマスを調べた。測定日はトゥモロコシが1993年9月05日、ダイズが9月08日である。

(2) 作物被覆率の高さ別割合

上から放射温度計で群落表面温度を測定すると、天空に面した葉面や土壌面の温度を測定することになる。そのため作物被覆率を測定した場合、被覆率を構成する葉(天空に面した葉)がどの層に属しているかが問題になる。被覆率を構成する葉が作物群落の下層に多く属している場合、群落表面温度は下層の葉を測定する割合が多くなるため、測定した群落表面温度は低くなる。

赤外線フィルムを用いて、トゥモロコシとダイズ各層の葉の分布割合を調べ、各層の天空に面した葉面積の割合を調べた。測定日は(1)と同じトゥモロコシが1993年9月05日、ダイズが9月08日である。

(3) 方向別な葉数

トゥモロコシのように葉が傾斜している場合には、方向別な葉数が群落表面温度に影響する。そのためトゥモロコシとダイズの10株づつについて、8方向別の葉数を調べた。測定日はトゥモロコシ、ダイズとも1993年9月01日である。

2.2 群落の構造による群落表面温度の相違

(1) 作物の種類別の葉の表面温度の違い,

作物の葉温は作物の種類によって異なることが報告されている(武智, 1973). しかし, 葉温は葉の方向, 土壌水分, 日射, 風速など多くの要素の影響を受ける. そのため測定畑と別にトゥモロコシとダイズを近接して栽植し, 土壌水分, 日射, 風速などの影響の差がないようにして, 両作物の葉の表面温度を比較した. 測定日は1993年8月16日と9月02日で, 8月16日は晴れたり曇ったりの日, 9月02日は晴れの日であった.

(2) 方向別の葉の表面温度

また, (1)と同時にトゥモロコシとダイズの葉を8方向別に分けて, 8時30分~15時30分まで1時間間隔に葉の表面温度測定した. 測定した葉は水平面で同じ方向の5枚の葉の表面温度を測定し, 平均してその方向の葉の表面温度とした. トゥモロコシの測定葉は第1層から第4層までの水平部分で日陰でないところを測定し, ダイズの測定葉は第1層の水平部分である.

(3) 群落の気温分布と群落表面温度

トゥモロコシとダイズでは群落構造が異なり, 群落表面温度を測定している葉の高度も異なる. 一方, 群落表面温度は気温に影響を与えると共に気温の影響を受けることが考えられる. そのためトゥモロコシ畑とダイズ畑で群落内の気温分布を測定した. 測定期間は1993年8月15日から8月26日まで, 測定高度はトゥモロコシ畑では地面から20cm, 50cm, 100cmと150cmの4高度, ダイズ畑では地面から10cm, 20cmと35cmの3高度である. 測定は15分ごと自記させ, 24時間連続測定した. なお, 群落表面温度は第IV章に示した連続測定している値を使用した.

第3節 観測結果と考察

3.1 作物群落の構造

(1) バイオマスの高さ別割合

トウモロコシ畑とダイズ畑において，面積 1m^2 の株を取って，高さ別なバイオマス（生体重）を調べた結果を図 V-1 に示す．

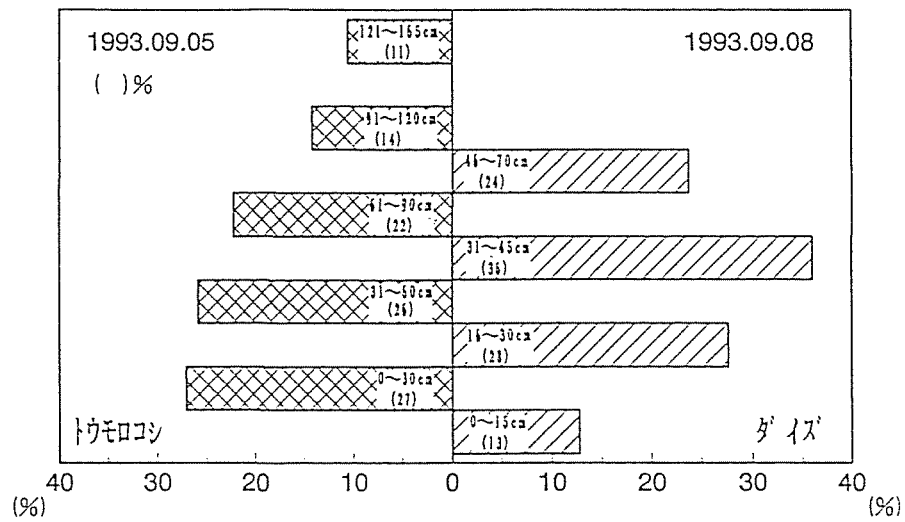


図 V-1 トウモロコシ畑およびダイズ畑のバイオマス分布

トウモロコシ畑は頂部から下部になるにしたがってバイオマスが多くなり，頂部は最もバイオマスが少なく，全体の11%であった．また，地表面付近（0～30cm）は最も多く，全体の27%であった．

一方，ダイズ畑は最もバイオマスが多いのは第2層で（全体の36%），第2層から第4層の地表面付近になるにしたがって少なくなる．また，頂部（第1層）は24%であり，最もバイオマスの少ない層は第4層の地表面付近で全体の13%である．

以上のようにトウモロコシ畑のバイオマス分布は三角形であるがダイズ畑の分布は逆の三角形に近い菱形である．ダイズの葉の分布については，中世古（1984）の研究があり，逆三角形を示すことを報告している．

(2) 作物被覆率の高さ別割合

被覆率を構成する各葉がどの層に属しているかを調べた。その結果を図 V-2 に示す。トウモロコシ畑は測定したときの被覆率は 80.6% で、このうち頂部から 121cm まで(第 1 層)に半数の 40.6% (全体を 100% とすると 50%) を占めていた。また、第 2 層から 4 層まではほぼ同じで、91~120cm (第 2 層) 11.7% (同 15%)、61~90cm (第 3 層) 14.8% (同 18%)、31~60cm (第 4 層) 12.2% (同 15%) であった。また、最下層(0~30cm)も 1.3% (同 2%) の割合であった。

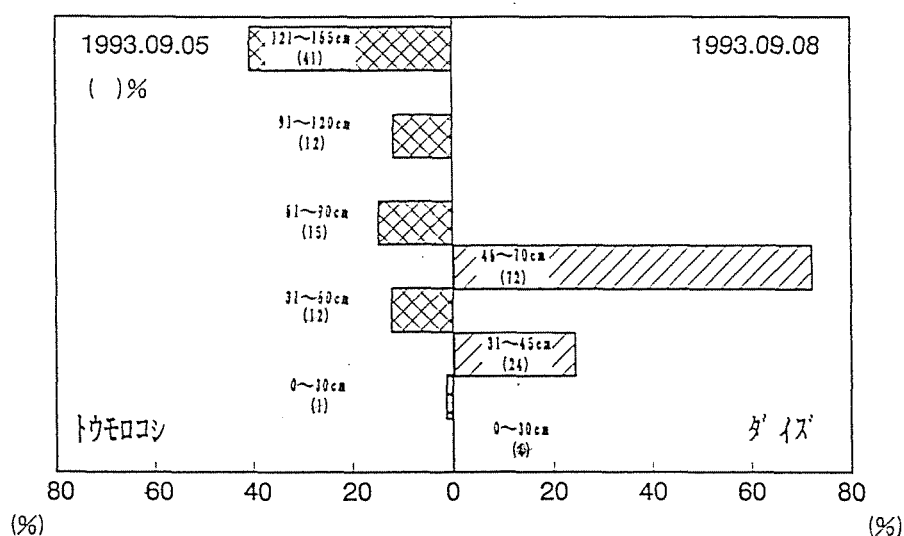


図 V-2 被覆率を構成する葉の高度別分布

ダイズ畑については測定時の被覆率は 95.9% で、トウモロコシ畑のように各層の分布は正確に測定できなかったが、71.8% (全体を 100% とすると 75%) が葉の頂部(日が当たっている部分)に属し、残りの約 24.1% (同 25%) はほとんど 31~60cm (第 1 層と第 2 層) であった。

このようにトウモロコシ畑とダイズ畑では作物被覆率の高さ別な割合は、対象的な分布をしている。すなわち、トウモロコシ畑は全層にわたって天空に面している葉が存在するのに対して、ダイズ畑は第 1 層と第 2 層のみである。この分布の違いが第 IV 章で判明した最高、最低群落表面温度の違いに現れている。

(3) 方向別な葉数

畑の群落の表面温度は構成する作物体の方向別な葉に影響される。特に傾斜している葉や向日性の葉を有する畑の群落表面温度は方向別な葉数に影響される。そのためトウモロコシとダイズの方向別葉数を調べた。

トウモロコシとダイズの10株ずつの方向別な葉数を調べた結果を図V-3に示す。図V-3は各方向の葉数を総葉数に対する割合として表している。トウモロコシについては、北西部に最も多く全体の21%で、次に南東部17%、最も少ないのは南西部の6%であった。ダイズについて東西南北方向にほぼ同じ分布率14~17%、他の4つの方向は7~11%であった。

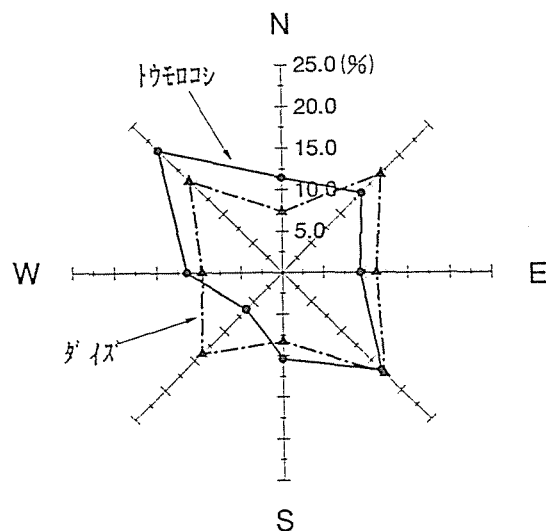


図 V-3 トウモロコシ葉とダイズ葉の方向別分布割合

(1993.09.01)

トウモロコシとダイズの方向別の葉数については、Bladら(1972)も測定している。Bladらは方向を東西南北の4方向に分け、トウモロコシは西が最も多く、最も少ないのは南であったと報告している。また、ダイズについては東が最も多く、最も少ないのは南と西であったと報告している。しかし、方向別の葉数の差は大きくない。

今回の測定ではダイズ畑については東西南北の方向別な葉数の差

は大きくないが、トウモロコシ畑では方向別な葉数にやや大きい差があった。これは両作物の葉の着性の特性によると思われる。すなわち、ダイズは均一に葉がでるのにたいして、トウモロコシは空間のある方向に葉がでるためである。

3.2 群落の構造による群落表面温度の相違

(1) 作物の種類別の葉の表面温度の違い

1993年8月16日のトウモロコシとダイズについて、方向別に葉の表面温度を調べた結果の例を図V-4に示した。図V-4によると、日射がある時、同じ方向の葉の表面温度について、トウモロコシとダイズのどちらが高いのかは一定しない。時間によって、トウモロコシが高い表面温度を示す場合と、ダイズの方が高い表面温度を示す場合がある。この結果は1日晴天であった1993年9月02日も同様である。しかし、8月16日について日射がない時には常にダイズの方が低い表面温度を示した。この結果はいずれの方向の葉についても同じである。

以上のことから、種々な条件を同じにした場合、ダイズの方が葉の表面温度が低いことが予想される。

葉温については武智(1973)の詳細な研究がある。それによると葉・気温差は日射の吸収熱量と蒸散熱量の差に比例するとしている。ダイズの葉は日射の影響が少なくなるとトウモロコシの葉より葉温は低くなることから、蒸散量の影響が考えられる。

(2) 方向別の葉の表面温度

図V-5に晴れであった1993年9月02日の東西南北の葉温の日変化を示した。ダイズは北向き葉を除いてトウモロコシより時間による変動が大きい。そのため時間別に全方向の平均葉の表面温度と標準偏差を計算した。その結果を表V-1に示す。ダイズの方が全ての時間で標準偏差が大きく、方向による表面温度の差が大きいことが判る。この原因はダイズは群落上部に属している葉が多いため、風速、

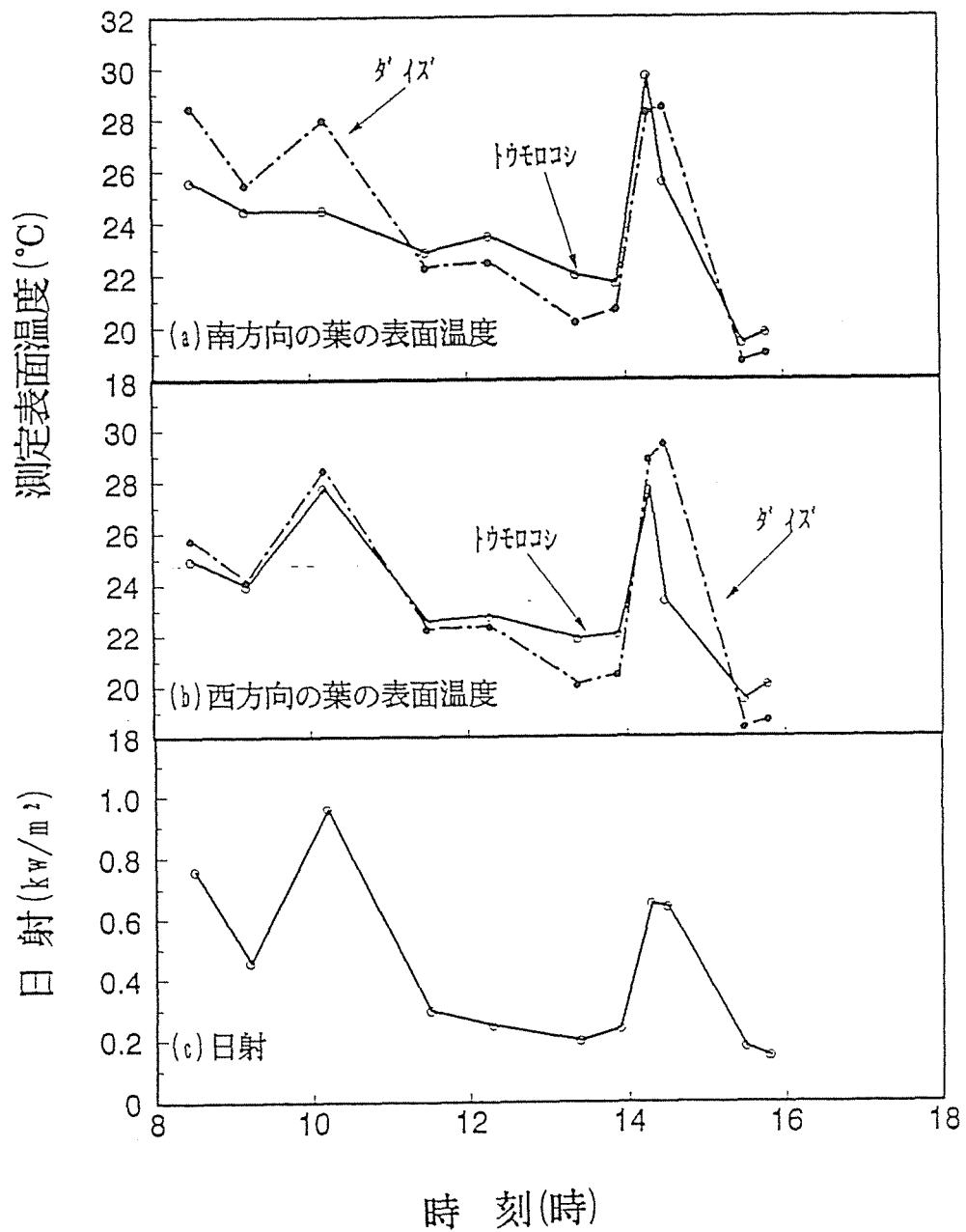


図 V-4 トウモロコシ葉とダイズ葉の表面温度の比較
(1993.08.16)

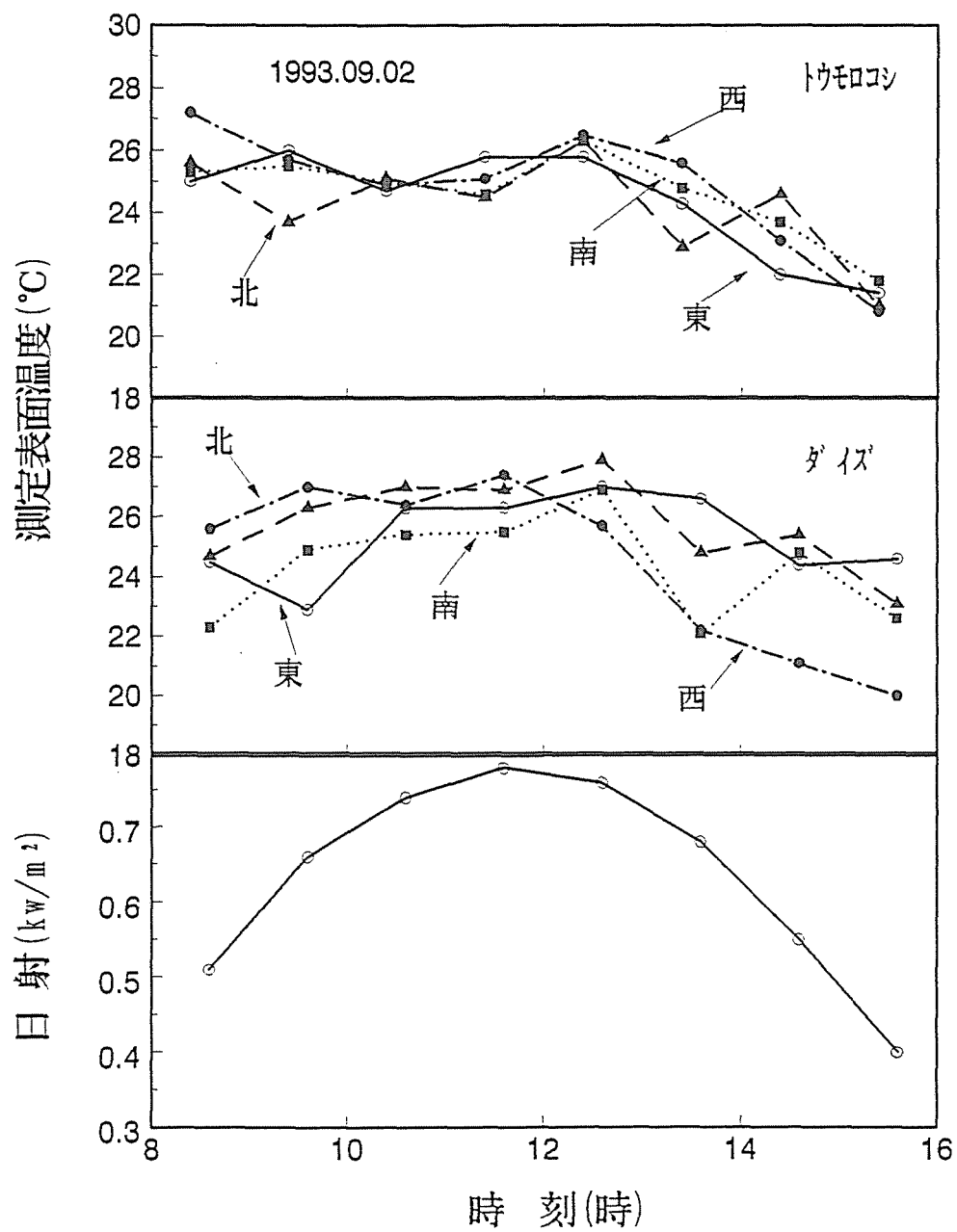


図 V - 5 東西南北方向の葉の表面温度と日射の変化

表 V -1 全方位の葉の平均表面温度と標準偏差

測定作物	測定時間	08:30	09:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30
		平均表面温度(°C)	25.3	25.4	25.0	25.6	26.1	24.6	23.4
トウモロコシ	標準偏差	1.1	0.8	0.3	0.9	0.2	1.0	1.1	0.4
ダイズ	平均表面温度(°C)	24.6	25.5	26.5	26.3	26.5	24.0	23.6	21.9
	標準偏差	1.3	1.5	1.1	0.7	1.3	1.7	1.4	1.7

気温などの群落上の影響を多く受けるためであると思われる。

図 V-6 は方向別に日平均表面温度を計算した結果である。ダイズはトウモロコシに比較して方向によって葉の表面温度が大きく異なる。また、測定した葉について全方向の日平均表面温度はダイズ 24.9°C 、トウモロコシ 24.6°C で、ダイズがやや高いが両作物葉の差は小さい。

以上のように、群落構造の違いは作物体の葉の表面温度分布に影響をおよぼし、ダイズの葉の表面温度はトウモロコシの葉の表面温度に比較して、時間的、方向的に大きく変動している。

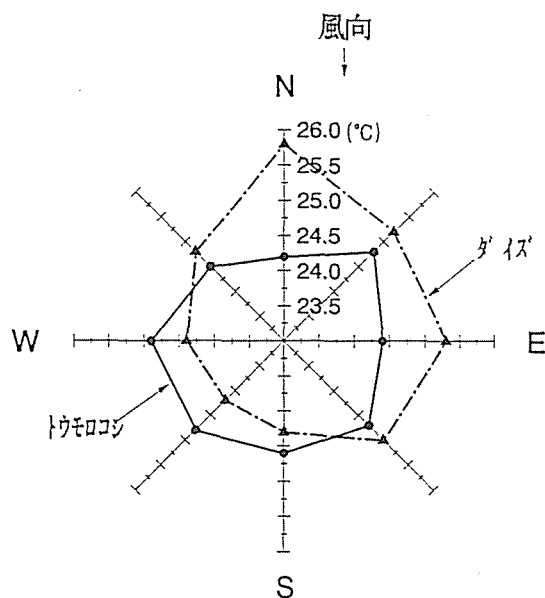


図 V-6 方向別の葉の日平均表面温度 (1993.09.02)

(3) 群落の気温分布と群落表面温度

測定期間中晴天であった8月24日の結果のうち典型的な気温分布を図 V-7 に示す。この時の被覆率はトウモロコシ畑 80.3%、ダイズ畑 32.7% であった。群落表面温度は最高温度に近い12時～14時にはトウモロコシ畑よりダイズ畑の方が高く、第 IV 章の結果と一致している。その前後はトウモロコシ畑の方がダイズ畑より高温であった。夜間の22時～朝7時頃はトウモロコシ畑とダイズ畑の群落表面温度はほぼ同じである。

また，トウモロコシ畑の気温分布は，日中は上層部が高く下層が低く，この勾配は12時より午前と午後に大きい．これに対してダイズ畑は17時の気温分布に示されているように最下層のみが特に低い温度分布を示している．

最上層部のトウモロコシ畑の気温とダイズ畑の気温を比較すると，日中はダイズ畑の方が高い．この影響が群落の表面温度に現れていると思われる．

一方，夜間はトウモロコシ畑とダイズ畑の群落表面温度の差はほとんどなく，また気温分布の高度差も小さい．

作物群落の表面温度は表面付近の気温に影響を与えるが，また気温の影響も受ける．そのため作物群落の気温分布は，その付近の葉の表面温度に近い値になる．

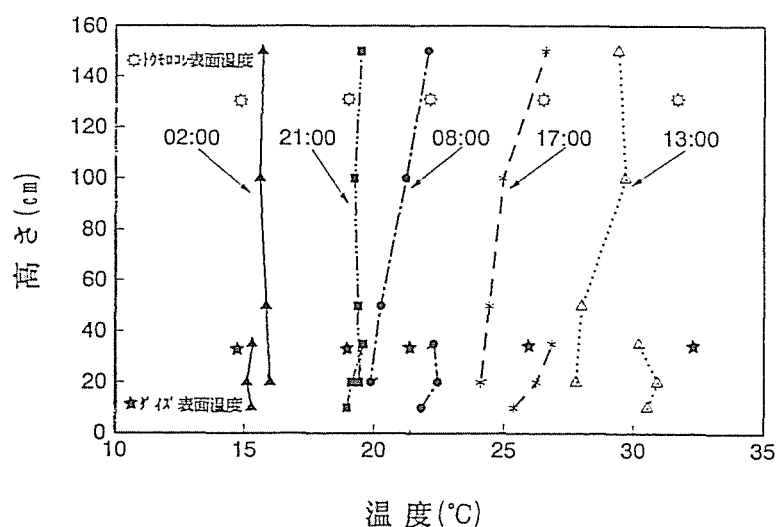


図 V -7 トウモロコシとダイズ畑の気温の分布と表面温度

(1993.08.24)

第4節 まとめ

この章の研究においてトウモロコシ畑とダイズ畑は高さ別なバイオマスや作物被覆率の高さ別割合ばかりでなく，方向別の葉数についても異なる特性があることが判明した．その結果，同じ群落構

造の作物でも葉の着性の特性によって群落表面温度が異なることが予想される。ダイズ葉の表面温度はトウモロコシ葉の表面温度に比較して、時間的、方向的に大きく変動している。

また、作物の葉には向日性を示すものもあり、これらの作物と群落表面温度の研究を行う必要がある。

第Ⅵ章 群落表面温度と気象要素の関係

第 VI 章 群落表面温度と 気象要素の関係

第 1 節 はじめに

群落表面は地表面付近の熱的現象の作用面として重要である。すなわち、太陽からの放射は地表面や群落表面に当り 1 部は反射するが、残りは地表面や群落表面に吸収され、地表面温度や群落表面温度を形成する。形成された地表面温度や群落表面温度は顕熱、潜熱や地中伝熱などに消費され、気温、湿度や地中温度を形成する。このように群落表面は地表付近の気象要素の形成に影響を与え、群落表面温度の変化は地表面付近の多くの気象要素の変化に関係する。そのため、群落表面温度と気象要素の関係を知ることは重要である。しかし、今まで群落表面温度と気象要素の関係を研究した論文はほとんどない。

群落表面を構成する作物の葉温と気象要素の研究は武智(1972)が行っている。武智は葉温が日射、蒸発散、風速の変化と密接な変化をしており、葉気温差は葉の日射吸収熱量と蒸発散熱量と直線関係するとしている。したがって、群落表面温度も葉温と同じように日射、蒸発散、風速に関係すると思われる。

この章は群落表面温度と気温、湿度、飽差、純放射、日射および風速などの気象要素との関係を解析し、群落表面温度がどのような気象要素によって支配されるかを調べた。

第 2 節 解析方法および解析項目

2.1 解析方法

解析に使用した群落表面温度、気温、日射量、純放射量のデータは、第 IV 章で使用した 1992 年と 1993 年の北大農場の 4 種類の畑の測定データおよび、苫小牧地方演習林の 1992 年の測定データである(第 IV 章第 2 節、参照)。これらの測定データについて(測定間隔は畑 15

分，森林10分)，1時間平均値を計算し，この平均値について解析した。

なお，畑の測定では，風速と湿度の測器を設置しなかったため，約50m離れた北大農場の観測露場のデータを使用した。北大農場の観測露場の風速計の高さは6.5mで，この風速データの毎正時の10分間平均値を使用した。また，湿度は露点計で1.5mの高さに設置しており，このデータの毎正時の瞬時値を使用した。

解析方法は，①群落表面温度と気温，飽差，湿度，純放射，日射，風速などの気象要素との単相関関係を調べた。また，地表面の熱収支解析では群落表面温度は気温，飽差，純放射，風速の影響を受ける。そのため，②群落表面温度と気温，飽差，純放射，風速との重回帰分析を行い，さらに，③標準化したデータで重回帰分析を行って群落表面温度への各気象要素の影響程度を調べた。また，④ステップワイズ分析によって群落表面温度に影響する気温，飽差，純放射，風速の累積寄与率を求めた。累積寄与率によって群落表面温度に影響する気象要素を幾つ考えれば良いかが判断できる。

2.2 解析項目

解析項目は①1992年の「全時期のデータの解析」，②1992年の「時期別データの解析」，③1992年と1993年の「畑の年別の比較」の3つの項目である。

(1) 全時期のデータの解析

群落表面温度と気象要素との関係は作物の繁茂状態や天候によって異なると思われる。しかし，両者の平均的な状態は全時期のデータを解析することによって得られる。そのため1992年の畑と森林の全時期のデータを使用して，全日，昼間，夜間について群落表面温度と気象要素との関係を解析した。

1992年の全測定データ数は，畑では6月28日から9月20日の欠測期間を除いた40日～49日間の960～1176時間分である。さらに，昼

(09:00～15:00)と夜(21:00～03:00)のデータ数は287～343時間分である。森林については、1992年7月10日から10月31日までの95日間の2280時間分で、昼・夜間のデータ数は665時間分である。

(2) 時期別データの解析

群落表面温度と気象要素との関係は、作物や森林の繁茂状態によって著しく異なる。そのため作物の被覆率の推移(図Ⅱ-1)を参考に、畑については全期間を3つに区分し、森林は2つに区分して解析した。

畑は被覆率が増加している期間を2分し、さらに、被覆率が一定の時期を加えた3区分である。すなわち、①第1期間(以下、生育初期)は6月28日～7月07日の9日間、216時間分、②第2期間(以下、生育中期)は7月22日～8月18日の13日間、312時間分、③第3期間(以下、生育後期)は8月21日～9月11日の17日間、408時間である。

また、森林の①第1期間(以下、繁茂期)は7月10日～9月15日の64日間、1536時間分で、この期間は被覆率が一定の時期である。②第2期間(以下、落葉期)は9月16日～10月31日の31日間、744時間分で、この期間の被覆率は落葉で低下しつつある時期である。

解析はこれらの期間について(1)と同様に全日、昼間、夜間について解析した。

(3) 畑の年別の比較

群落表面温度と気象要素との関係は作物の生育経過によって異なるため、1992年と1993年がどのように異なるかを調べた。1992年はダイズやトウモロコシの生育は順調であったが、1993年はダイズの生育が悪く被覆率の最大値も小さい(図Ⅶ-2参照)。

両年の比較は畑の1992年の晴天日データの解析結果と1993年の晴天日のデータの解析結果で行なった。これは1993年が測定器の関係で晴天日しか測定していないためである。晴天日については群落表面温度と気象要素との関係は典型的な状態である。また全時期のデータの結果と大きな隔たりはない。

畑の1992年の晴天日のデータは12～16日間(6月-3日間, 7月-2日間, 8月-7日間, 9月-4日間)の288～384時間, 昼・夜間は84～112時間分である。また, 1993年は12日間(6月-4日間, 7月-5日間, 8月-3日間)の288時間, 昼・夜間は84時間分である。

第3節 結果および考察

3.1 全時期のデータの解析

(1) 全時期の畑の群落表面温度と気象要素との相関

1992年畑の全時期の測定データについては, ダイズ畑は1176時間, トウモロコシ畑は1152時間, キャベツ畑は960時間のデータが得られた。ダイズ畑の解析例を図VI-1～6に示す。また, ダイズ畑, トウモロコシ畑, キャベツ畑の群落表面温度と各気象要素(気温, 飽差, 湿度, 純放射, 日射, 風速)との単相関係数を表VI-1に示す。

これらの図表によると, いずれの畑についても群落表面温度と気温との相関が最も良く, ついで飽差, 日射または純放射, 湿度, 風速の順であった。なお, 純放射と日射の相関係数はほぼ同じであった。純放射は日射と直線関係にあり, このことは多くの人達が発表している(たとえば, 中川ら1960, 伊藤ら1984)。したがって, 以後の解析結果は純放射のみを用いた。

1992年の畑における全時期のデータについて, 後に示すように(VI-3式, 参照)群落表面温度は気温, 飽差, 純放射, 風速の関数と考えられる。そのため群落表面温度(T_s)と気温(T_a), 飽差(d), 純放射(R_n), 風速(W)の重回帰式を計算した。その結果を表VI-2に示す。

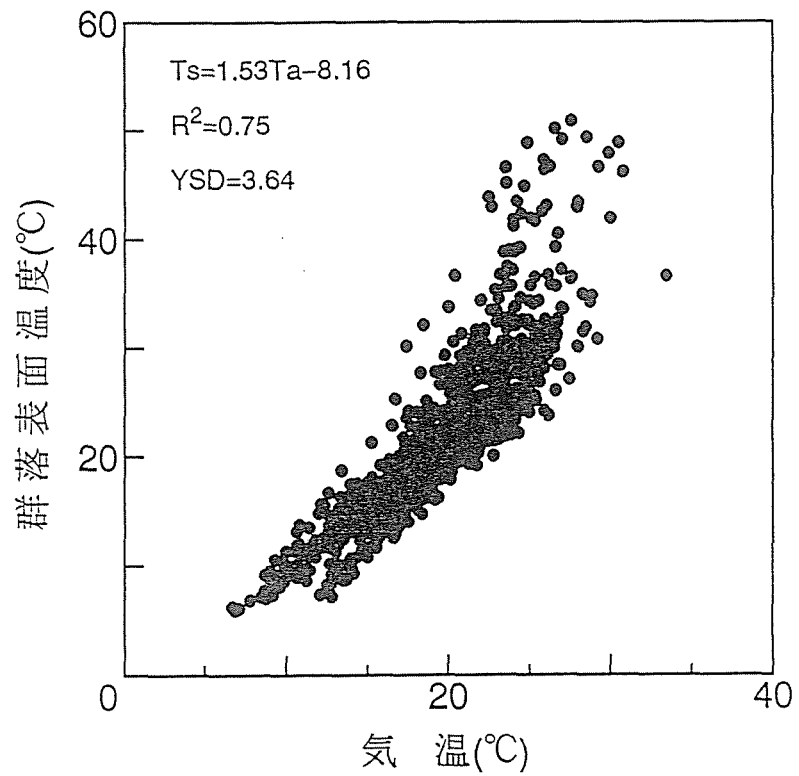


図 VI - 1 群落表面温度と気温の関係 (1992年ダイズ畑)

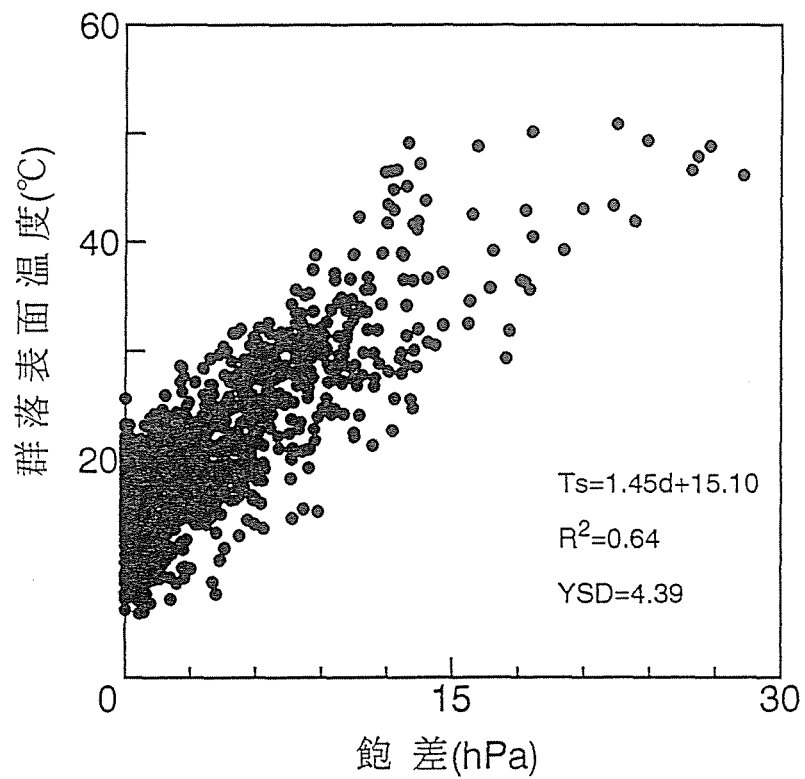


図 VI - 2 群落表面温度と飽差の関係 (1992年ダイズ畑)

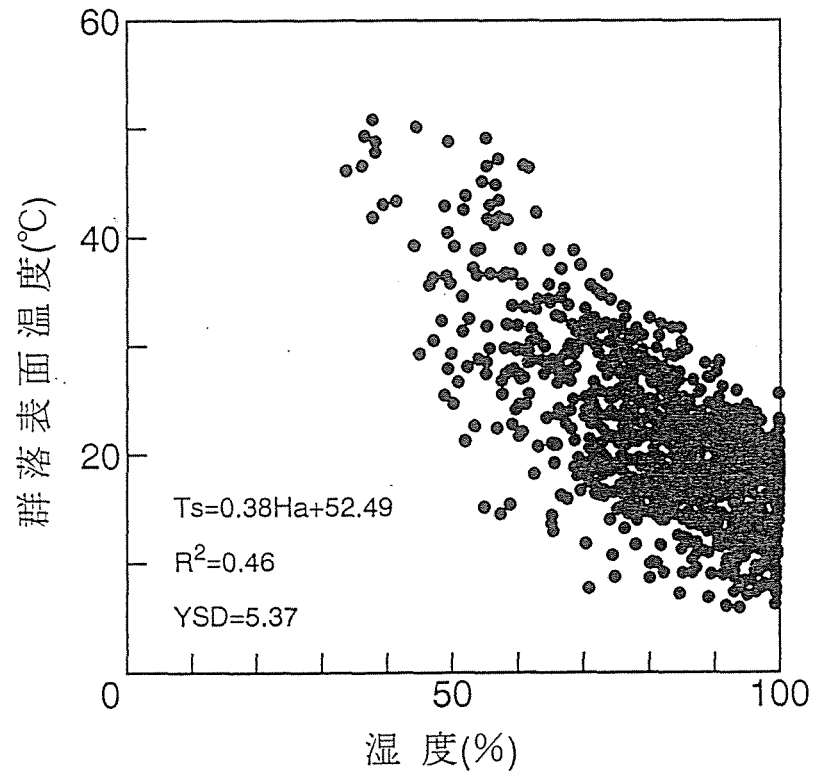


図 VI - 3 群落表面温度と湿度の関係 (1992年ダイズ畑)

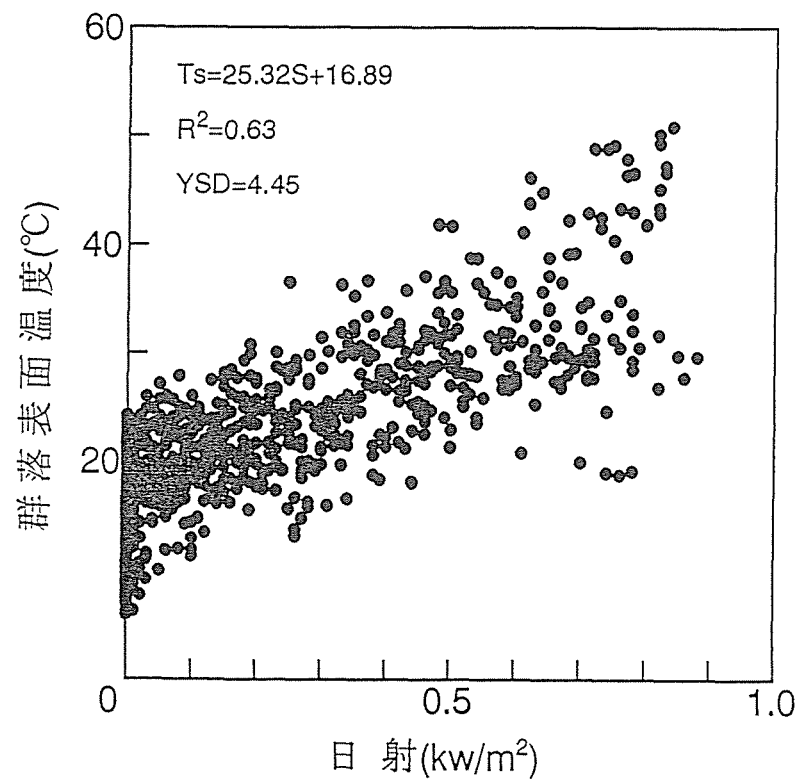


図 VI - 4 群落表面温度と日射の関係 (1992年ダイズ畑)

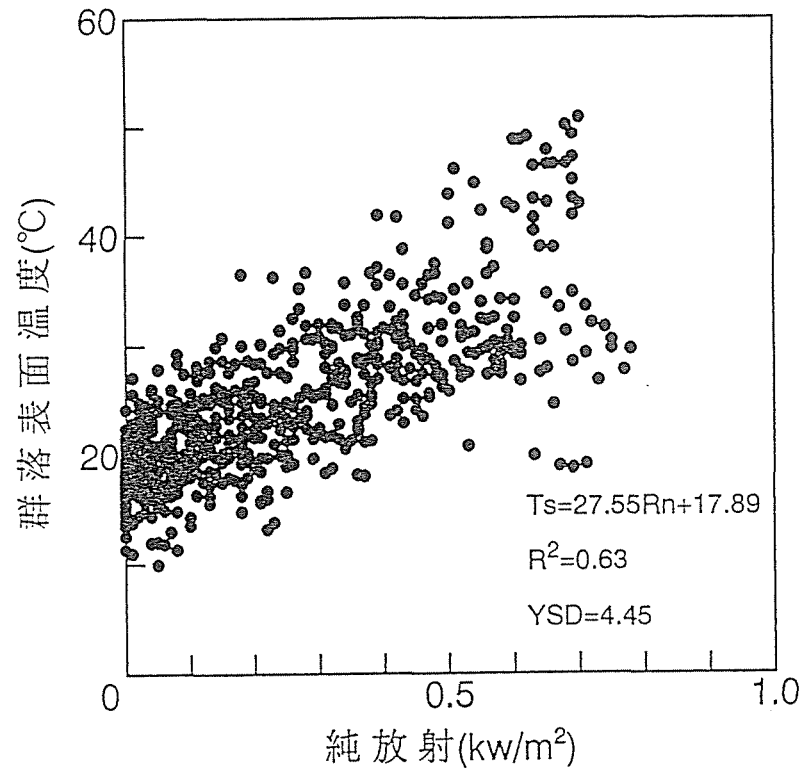


図 VI -5 群落表面温度と純放射の関係(1992年ダイズ畑)

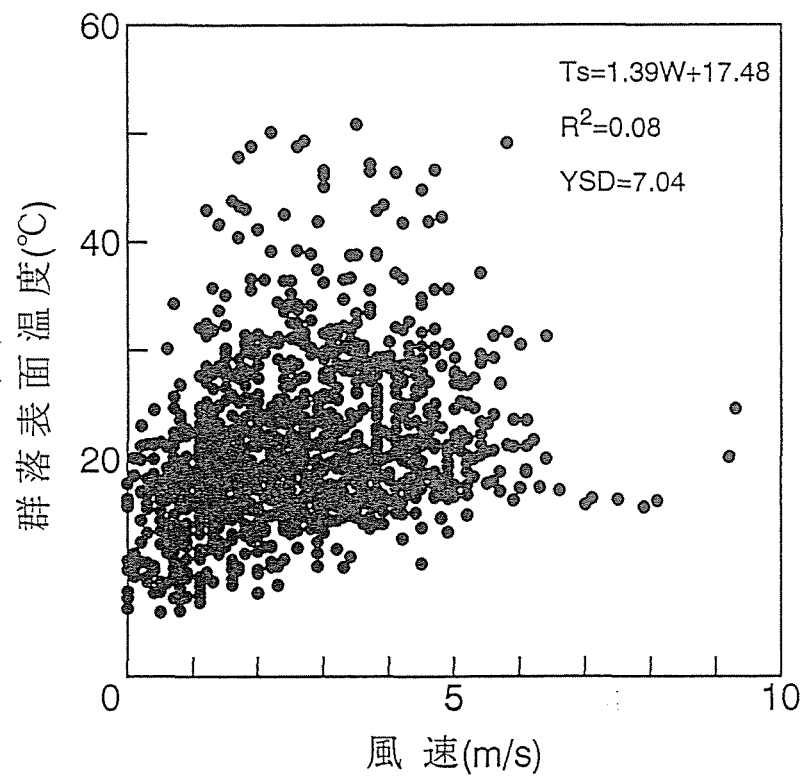


図 VI -6 群落表面温度と風速の関係(1992年ダイズ畑)

表 VI-1 群落表面温度と気象要素との単相関係数
(1992年畑)

作物畑	気温	飽差	湿度	純放射	日射	風速	データ数
ダイズ	0.87**	0.80**	-0.68**	0.79**	0.79**	-0.28**	1176
トウモロコシ	0.81**	0.79**	-0.67**	0.72**	0.73**	-0.24**	1152
キャベツ	0.86**	0.86**	-0.69**	0.78**	0.78**	-0.22**	960

** : 1%有意水準, * : 5%有意水準

表 VI-2 群落表面温度と気象要素との重回帰式
(1992年畑)

作物畑	回帰式	R ²	SD
ダイズ	Ts=0.97 Ta + 0.39 d + 11.62 Rn - 0.13 W + 0.07	0.91	2.25
トウモロコシ	Ts=0.96 Ta + 0.75 d + 8.72 Rn - 0.28 W - 0.19	0.81	3.74
キャベツ	Ts=1.02 Ta + 0.27 d + 10.86 Rn - 0.21 W - 0.88	0.86	2.62

注 : Ts:群落表面温度, Ta:気温, d:飽差, Rn:純放射, W:風速

表 VI-2によると、寄与率（または決定係数 : R^2 ）は 0.81～0.91 の高い値を示し、群落表面温度の分散（バラツキ）が気温、飽差、純放射、風速によって 81～91% 説明できることを示している。しかし、推定値の標準誤差（SD）は 2.25～3.74 と大きい。また、重回帰式において気温、飽差、純放射、の回帰係数は正であるが、風速の回帰係数は負である。さらに、気温の回帰係数は 1 に近い。

表 VI-2 の結果は気温、飽差、純放射、風速の測定単位がそれぞれ異なるため、群落表面温度に各気象要素がどの程度影響を及ぼしている明かでない。そのため気温、飽差、純放射、風速を標準化（平均を 0、標準偏差を 1）して重回帰式を計算した。この標準重回帰式の回帰係数の大小によって、群落表面温度に影響する気象要素の程度を比較できる。表 VI-3 にその結果を示す。なお、表 VI-3 では群落表面温度は標準化していない。

表 VI-3 によると、気温の標準回帰係数が最も大きく、群落表面温度への影響も大きい。次いで、ダイズ畑、キャベツ畑は純放射の標準回帰係数が大きく、群落表面温度への影響が大きい。しかし、トウモロコシ畑はダイズ畑、キャベツ畑と異なり飽差の方が純放射よ

り影響が大きい。トウモロコシ畑の群落表面温度の特徴は他の畑と異なることは、第IV章でも見られた。

この標準回帰係数の大きさの順位にしたがって、群落表面温度への累積寄与率を調べた。その結果を表VI-4に示す。

表 VI - 3 群落表面温度と気象要素との標準重回帰式
(1992年畑)

作物畑	標準回帰式	データ数
ダイズ トウモロコシ キャベツ	$T_s = 4.00 T_a + 1.58 d + 2.46 R_n - 0.19 W + 21.06$	1176
	$T_s = 3.99 T_a + 3.01 d + 1.82 R_n - 0.43 W + 21.45$	1152
	$T_s = 3.84 T_a + 1.10 d + 2.31 R_n - 0.32 W + 21.03$	960

注：Ts:群落表面温度, Ta:気温, d:飽差, Rn:純放射, W:風速

表 VI - 4 群落表面温度と各気象要素の累積寄与率
(1992年畑)

作物畑	気象要素(累積寄与率)			
ダイズ トウモロコシ キャベツ	気温 (0.75)	純放射 (0.89)	飽差 (0.91)	風速 (0.91)
	気温 (0.65)	飽差 (0.78)	純放射 (0.80)	風速 (0.81)
	気温 (0.74)	純放射 (0.85)	飽差 (0.85)	風速 (0.86)

表VI-4によると各畑とも群落表面温度は、2種類の気象要素で78～89%まで説明できることを示している。しかし、トウモロコシ畑はダイズ畑、キャベツ畑と異なり、第2の気象要素は飽差である。

以上の結果を要約すると、①群落表面温度と気温との単相関関係が最も良く、ついで飽差、日射または純放射、湿度、風速の順である。②しかし、ダイズ畑、キャベツ畑の重回帰分析では群落表面温度は気温、純放射の順で影響が大きい。③トウモロコシ畑の群落表面温度と気象要素の関係は他の畑と異なる。④各畑とも群落表面温度は、2つの気象要素で78～89%まで説明できる。

群落表面温度と気象要素との関係を考察するため、群落表面の熱収支を考えた。群落表面の熱収支は、基準面から出るエネルギーを負にすると(VI-1)式で表される。

$$0 = R_n + lE + Q + G \quad (\text{VI-1})$$

ただし， R_n ：純放射， lE ：潜熱伝達量， Q ：顕熱伝達量， G ：群落内への伝達量

$$lE = -(\rho \cdot C_p / \gamma) \cdot (e_s(T_s) - e_a) / (r_a + r_c)$$

$$Q = -(\rho \cdot C_p / r_H) \cdot (T_s - T_a)$$

ただし， T_s ：群落表面温度， T_a ：気温， e_a ：水蒸気圧， $e_s(T_s)$ ：温度 T_s の時の飽和水蒸気圧， ρ ：空気の密度， C_p ：空気の比熱， r_a ：空気力学的抵抗， r_c ：群落抵抗， γ ：乾湿計定数， r_H ：顕熱輸送抵抗。

また， $e_s(T_s) = e_s(T_a) + \phi(T_s - T_a)$ と仮定し， $\gamma^* = \gamma(r_a + r_c) / r_a$ すると，(VI-1)式は (VI-2)式のようになる。

$$T_s = T_a - \{e_s(T_a) - e_a\} / (\phi + \gamma^*) + \{(R_n + G)r_H \cdot \gamma^*\} / \{\rho \cdot C_p(\phi + \gamma^*)\} \quad (\text{VI-2})$$

ただし， ϕ ：飽和水蒸気圧の時の温度変化率。

実際には狭い畑などでは移流があるため，(VI-1)式には風速(W)の関数である移流の項 $X(W)$ が含まれる。したがって，(VI-2)式は (VI-3)式になる。

$$T_s = T_a - A \cdot d + B(R_n + G) + X(W) \quad (\text{VI-3})$$

ただし，

$$d = e_s(T_a) - e_a$$

$$A = 1 / (\phi + \gamma^*)$$

$$B = r_H \cdot \gamma^* / \rho \cdot C_p(\phi + \gamma^*)$$

(VI-3)式において， A と B の変動は小さいと仮定して， G は R_n に比較

して小さいので無視すると，群落表面温度は気温，飽差，純放射，風速の関数などになる．

(VI-3)式の結果と表VI-2の結果を比較すると，表VI-2では気温の回帰係数は1に近く，(VI-3)式の結果と略一致する．しかし，飽差の回帰係数は(VI-3)式では負になるはずであるが，表VI-2の結果は飽差の回帰係数は正である．理論的には飽差が大きくなると蒸発散が多くなり群落表面温度は低下するはずである．しかし，表VI-1にも見られるごとく飽差と群落表面温度は正の相関がある．これは飽差には気温の影響が含まれているためと思われる．さらに，移流に関係する風速の回帰係数は負を示し，風が強くなると群落表面温度が低くなることと対応している．また風速と群落表面温度の相関係数(表VI-1)や標準回帰係数(表VI-3)が小さく，群落表面温度に風速はあまり関与しない．すなわち，群落表面温度は気温，飽差，純放射に大きく影響されると結論できる．

(2) 昼・夜間別の畑の群落表面温度と気象要素との相関

昼と夜では群落表面温度と気象要素との関係が異なることが予想される．そのため昼(09:00～15:00)と夜(21:00～03:00)のデータについて解析した．その結果を表VI-5～8に示す．

表VI-5によると昼間の群落表面温度と気象要素との単相関関係は，飽差が最も大きく，次いで気温，湿度，純放射で，風速の相関係数は零に近い．また，(1)の全日のデータに比較して，気温，飽差，湿度，純放射，日射などの気象要素による差異が少ない．これに対して，夜間は気温のみの単相関係数が特に大きい．すなわち，昼と夜では群落表面温度に影響する気象要素が異なるといえる．

表VI-6に示した昼・夜間別の群落表面温度と気象要素との重回帰式を見ると，気温の回帰係数は昼間は夜間より小さく，1からの隔たりが大きい．これは飽差などに気温の影響が含まれているためと思われる．また，飽差の回帰係数は夜間には負を示し，風速は正を示している．すなわち，飽差は群落表面温度に対して昼は正の影響

であるが、夜間は負の影響である。また、風速は昼は負の影響であるが、夜間は正の影響である。

全体的に夜間の方が寄与率(R^2)が大きく、推定値の標準誤差(SD)が小さいため(すなわち、寄与率や標準誤差が良い)、群落表面温度を気象要素から正確に推定できるが、昼間は推定精度が悪い(寄与率が小さく、推定値の標準誤差が大きい)。また、夜間は畑による推定値の標準誤差の差が小さいが、昼間のトウモロコシ畑は他の畑と異なり推定値の標準誤差が大きく、推定精度が悪い。

各気象要素の群落表面温度への影響程度を調べるため、標準化した重回帰式を計算した。その結果を表 VI-7 に示す。

昼間はダイズ畑、キャベツ畑は気温が最も影響するが、トウモロコシ畑は飽差が最も影響が大きい。また、ダイズ畑、キャベツ畑は単相関係数で見られたと同じように、気温、飽差、純放射の標準回帰係数に大きな差は無く、群落表面温度への影響は同じ程度である。しかし、トウモロコシ畑は飽差の標準回帰係数が大きく、群落表面温度に大きな影響をおよぼし、純放射は標準回帰係数が小さく、ダイズ畑、キャベツ畑より影響は少ない。

一方、夜間は気温のみが他の気象要素より約30～50倍も大きな影響を示している。この標準回帰係数の大きい順に重回帰式を計算して、累積寄与率を調べた。その結果を表 VI-8 に示す。

昼間については各作物とも採用すべき気象要素の順位は異なり、ダイズ畑、キャベツ畑は3つの気象要素で82%と73%の寄与率がある。しかし、トウモロコシ畑は飽差と気温で67%の寄与率で、風速までの4要素を入れても68%しかない。すなわち回帰式による推定精度は悪い。夜間については気温のみで86～93%の寄与率である。

以上を要約すると、①昼間は気温、純放射、飽差などがほぼ同じ程度、群落表面温度に影響するが、夜間は気温のみの影響が大きい。②昼間より夜間の推定値の標準誤差が小さく、回帰式による推定精度が良い。③昼間は作物によって気象要素の影響程度が異なるが、

夜間は作物による各気象要素の影響程度の差が小さい。

表 VI-5 昼・夜別の単相関係数の比較(1992年畑)

昼 間	作物畑	気温	飽差	湿度	純放射	風速	データ数
	ダイズ トウモロコシ キャベツ	0.78** 0.69** 0.75**	0.82** 0.78** 0.76**	-0.72** -0.68** -0.71**	0.69** 0.57** 0.66**	-0.00 -0.00 -0.10	343 336 287
夜 間	作物畑	気温	飽差	湿度	純放射	風速	データ数
	ダイズ トウモロコシ キャベツ	0.93** 0.96** 0.94**	-0.24** -0.26** -0.22**	0.00 0.00 0.00	0.48** 0.36** 0.46**	0.26** 0.20** 0.17*	343 343 287

** : 1%有意水準, * : 5%有意水準

表 VI-6 昼・夜別の重回帰式の比較(1992年畑)

昼・作物畑	昼間の重回帰式	R ²	SD
ダイズ トウモロコシ キャベツ	Ts=0.82 Ta + 0.58 d + 10.43 Rn - 0.29 W + 2.69	0.83	3.10
	Ts=0.84 Ta + 1.02 d + 7.23 Rn - 0.20 W + 0.42	0.68	5.71
	Ts=0.84 Ta + 0.41 d + 10.61 Rn - 0.37 W + 2.58	0.73	3.75
夜・作物畑	夜間の重回帰式	R ²	SD
ダイズ トウモロコシ キャベツ	Ts=1.02 Ta - 0.16 d + 26.76 Rn + 0.36 W - 0.29	0.91	1.15
	Ts=1.08 Ta - 0.13 d + 0.58 Rn + 0.25 W - 1.44	0.94	0.93
	Ts=1.15 Ta - 0.26 d + 23.37 Rn + 0.29 W - 2.69	0.94	0.89

注 : Ts:群落表面温度, Ta:気温, d:飽差, Rn:純放射, W:風速

表 VI-7 昼・夜別の標準重回帰式の比較(1992年畑)

昼・作物畑	昼間の標準回帰式	データ数
ダイズ トウモロコシ キャベツ	Ts=3.00 Ta + 2.85 d + 2.04 Rn - 0.40 W + 27.80	343
	Ts=3.08 Ta + 4.90 d + 1.41 Rn - 0.28 W + 28.19	337
	Ts=2.97 Ta + 2.10 d + 2.15 Rn - 0.53 W + 27.04	287
夜・作物畑	夜間の標準回帰式	データ数
ダイズ トウモロコシ キャベツ	Ts=3.34 Ta - 0.23 d + 0.64 Rn + 0.51 W + 16.36	343
	Ts=3.53 Ta - 0.19 d + 0.13 Rn + 0.36 W + 16.87	343
	Ts=3.18 Ta - 0.38 d + 0.63 Rn + 0.42 W + 16.78	287

注 : Ts:群落表面温度, Ta:気温, d:飽差, Rn:純放射, W:風速

表 VI - 8 昼・夜別の累積寄与率の比較(1992年畑)

昼・作物畑	気象要素(累積寄与率)			
ダイズ トウモロコシ キャベツ	気温 (0.61)	飽差 (0.78)	純放射 (0.82)	風速 (0.83)
	飽差 (0.61)	気温 (0.67)	純放射 (0.67)	風速 (0.68)
	気温 (0.56)	純放射 (0.69)	飽差 (0.73)	風速 (0.73)
夜・作物畑	気象要素(累積寄与率)			
ダイズ トウモロコシ キャベツ	気温 (0.86)	純放射 (0.90)	風速 (0.91)	飽差 (0.91)
	気温 (0.93)	風速 (0.93)	飽差 (0.94)	純放射 (0.94)
	気温 (0.88)	純放射 (0.93)	風速 (0.93)	飽差 (0.94)

(3) 森林の群落表面温度と気象要素との相関

1992年の森林の測定は5月03日から10月31日の155日間について行った。しかし、乾湿計を設置したのは7月10日であるため、湿度と飽差のデータは7月10日から10月31日までの95日分(2280時間分)である。解析は7月10日から10月31日までの95日分について行った。

畑と同様に単相関係数、重回帰式、標準重回帰式、累積寄与率を計算した。その結果を表VI-9～12に示す。

群落表面温度と各気象要素との単相関については畑と大きな差はない。すなわち、全日のデータと昼間のデータは気温、純放射、日射、飽差などが相関が大きい。また、夜間は昼間に比較して気温が特に相関が大きいことも畑と同じである。しかし、夜間の場合、純放射が畑より相関係数が大きい。

群落表面温度と気象要素との重回帰式を表VI-10に示す。気温の回帰係数は全日と昼・夜間の差はほとんど無く、1に近い値を示している。この傾向は畑と異なる。すなわち畑では昼の回帰係数は約0.8で1との隔たりが大きかった。また、飽差の回帰係数は全日、昼・夜とも負になっている。純放射の回帰係数は全日、夜間ともダイズ畑、キャベツ畑の回帰係数(表VI-2, VI-6, 参照)と近似であるが、昼はやや小さい。さらに、風速の回帰係数は全日と昼は負、夜は正で畑と同じである。これらの気象要素の影響程度を調べるため、標準重回帰式を計算した。

標準重回帰式を畑と比較すると気温の標準回帰係数が畑より大きく、気温の影響が大きいのが判る。また、畑より飽差の係数が特に小さく影響が少ない。すなわち、森林の群落表面温度は気温に大きく影響される。

標準回帰係数を基に各気象要素の寄与率を調べた。その結果を表 VI-12 に示す。気温のみで寄与率は 84～97% を占めている。

表 VI-9 1992 年森林の単相関係数

区 分	気温	飽差	湿度	純放射	風速	データ数
全日のデータ	0.95**	-0.36**	0.14**	0.57**	-0.10*	2280
昼間(9～15時)	0.92**	-0.42**	0.10*	0.53**	-0.10*	665
夜間(21～3時)	0.98**	-0.10*	0.36**	0.67**	0.10*	665

** : 1%有意水準, * : 5%有意水準

表 VI-10 1992 年森林の重回帰式

区 分	回 帰 式	R ²	SD
全日のデータ	Ts=1.08 Ta - 0.33 d + 10.39 Rn - 0.12 W - 3.70	0.94	1.43
昼(9～15時)	Ts=1.08 Ta - 0.16 d + 6.92 Rn - 0.45 W - 2.70	0.88	1.63
夜(21～3時)	Ts=1.09 Ta - 0.23 d + 21.41 Rn + 0.09 W - 4.32	0.98	0.80

注 : Ts:群落表面温度, Ta:気温, d:飽差, Rn:純放射, W:風速

表 VI-11 1992 年森林の標準重回帰式

区 分	標準重回帰式	データ数
全日のデータ	Ts=4.98 Ta - 0.86 d + 1.59 Rn - 0.13 W + 12.60	2280
昼(9～15時)	Ts=4.04 Ta - 0.50 d + 1.17 Rn - 0.09 W + 16.18	665
夜(21～3時)	Ts=5.10 Ta - 0.24 d + 0.54 Rn + 0.09 W + 10.23	665

注 : Ts:群落表面温度, Ta:気温, d:飽差, Rn:純放射, W:風速

表 VI-12 1992 年森林の累積寄与率

区 分	気象要素 (累積寄与率)				
全日のデータ	気温 (0.90)	純放射 (0.92)	飽 差 (0.94)	風速 (0.94)	
昼 (9～15時)	気温 (0.84)	純放射 (0.87)	飽 差 (0.87)	風速 (0.88)	
夜 (21～3時)	気温 (0.97)	純放射 (0.98)	飽 差 (0.98)	風速 (0.98)	

以上、畑と比較した森林の特徴は、①畑より気温の影響が大きい。②気温の昼・夜間の差は畑より大きくない。この原因は、森林は測定当初から被覆率が大いため、植生の特徴が強く表れるためと思われる。

作物，森林の解析によって判明したことは，①日中は群落表面温度と気温，飽差，湿度，純放射，日射との相関関係が大きい．②しかし，夜間は特に気温との相関関係が大きい．③重回帰分析で気温の回帰係数は1に近い．④しかし，昼間より夜間の方が1に近い．⑤畑の昼間は作物によって，回帰係数，寄与率，推定値の標準誤差などが異なる．⑥しかし，夜間は作物間の大きな差はない．⑦森林は畑より寄与率，推定値の標準誤差などが良い．⑧群落表面温度は2気象要素によって精度良く推定できる．⑨この2要素は気温と純放射である場合が多い．

3.2 時期別データの解析

(1) 畑の群落表面温度と気象要素との時期別の解析

1) 単相関係数の比較

群落表面温度と気象要素の時期別の単相関係数の比較を表VI-13に示す．表VI-13によると生育初期(06/28～07/07)には，群落表面温度と純放射の単相関が気温の単相関より高いが，生育中期(07/22～08/18)，生育後期(08/21～09/11)には気温の単相関が最も高い．風速の単相関は生育初期に比較して，生育中期，生育後期が小さい．

表VI-13 時期別の全日の単相関係数の比較
(1992年畑)

06/28	作物畑	気温	飽差	湿度	純放射	風速	データ数
07/07	ダイズ	0.92**	0.89**	0.90**	0.94**	0.54**	216
	トウモロコシ	0.89**	0.88**	0.89**	0.95**	0.63**	216
	キャベツ	0.87**	-0.84**	-0.87**	0.92**	0.55**	216
07/22	作物畑	気温	飽差	湿度	純放射	風速	データ数
08/18	ダイズ	0.90**	-0.66**	-0.47**	0.70**	0.10*	312
	トウモロコシ	0.89**	0.71**	-0.55**	0.71**	0.20**	312
	キャベツ	0.91**	-0.57**	0.37**	0.65**	0.10*	312
08/21	作物畑	気温	飽差	湿度	純放射	風速	データ数
09/11	ダイズ	0.93**	0.77**	0.58**	0.77**	0.17**	408
	トウモロコシ	0.95**	0.72**	0.53**	0.69**	0.17**	408
	キャベツ	0.94**	-0.72**	0.51**	0.73**	-0.14**	408

** : 1%有意水準, * : 5%有意水準

全体的に生育初期は純放射，気温，湿度，飽差の単相関が高いが，生育中期，生育後期は特に気温のみの単相関が0.89以上を示し高い。

昼・夜間別でも単相関を調べた。その結果，全日と特に異なる点は，①生育前期の昼間の風速の単相関は0であるが，夜間には単相関は0.37～0.54で有意性がある，②夜間の純放射の単相関は生育前期から生育中期，生育後期に近づく悪くなることが見られた。

2) 重回帰式の比較

群落表面温度と各気象要素との重回帰式を表VI-14に示す。表VI-14によると，寄与率(R^2)は各期とも0.90以上の高い値を示している。特に，生育後期の寄与率は高い。推定値の標準誤差(SD)は生育初期から生育後期になるにつれて良くなる。飽差の回帰係数は，トウモロコシ畑の全ての生育期で正、キャベツ畑の全ての生育期で負である。

重回帰式について昼・夜間別に調べた。その結果，①昼・夜間とも寄与率，推定誤差は生育前期から中期，後期になるにしたがって悪くなる。②生育前期の昼間の気温の回帰係数はダイズ畑で+0.27，トウモロコシ畑で-0.27，キャベツ畑で-0.78と，特に小さい。③夜間の飽差の回帰係数は生育前期のダイズ以外は，全て負である。

表 VI -14 時期別の全日の重回帰式の比較
(1992年畑)

06/28～07/07	(生育前期) 回 帰 式	R^2	SD
ダ イ ズ トウモロコシ キャベツ	Ts=1.12 Ta + 0.06 d + 26.00 Rn + 0.03 W - 3.17	0.95	2.53
	Ts=1.12 Ta + 0.01 d + 39.25 Rn + 0.06 W - 0.45	0.95	3.25
	Ts=0.99 Ta - 0.19 d + 28.58 Rn + 0.27 W - 0.12	0.90	3.30
07/22～08/18	(生育中期) 回 帰 式	R^2	SD
ダ イ ズ トウモロコシ キャベツ	Ts=1.08 Ta - 0.01 d + 8.24 Rn + 0.01 W - 1.68	0.92	1.39
	Ts=0.97 Ta + 0.14 d + 6.59 Rn + 0.17 W + 0.02	0.92	1.28
	Ts=1.18 Ta - 0.23 d + 7.67 Rn + 0.06 W - 3.52	0.91	1.44
08/21～09/11	(生育後期) 回 帰 式	R^2	SD
ダ イ ズ トウモロコシ キャベツ	Ts=0.99 Ta + 0.08 d + 10.45 Rn + 0.08 W + 0.54	0.97	0.92
	Ts=1.07 Ta + 0.01 d + 6.54 Rn + 0.17 W - 1.32	0.95	1.08
	Ts=1.07 Ta - 0.03 d + 9.79 Rn - 0.04 W - 1.29	0.95	1.19

注：Ts:群落表面温度，Ta:気温，d:飽差，Rn:純放射，W:風速

3) 標準重回帰式の比較

気温，飽差，純放射，風速のデータを標準化して重回帰式を計算した．全日の結果を表 VI-15 に示す．表 VI-15 によると生育初期には気温より純放射の標準回帰係数が大きく，群落表面温度への影響が大きいことがわかる．しかし，生育中期と後期は純放射の標準回帰係数は気温の標準回帰係数の約 1/2 である．飽差，風速は各期とも標準回帰係数は小さく，群落表面温度にほとんど影響しない．

また，昼・夜間別の解析では昼間は生育前期には純放射に次いで飽差の影響が大きい，生育中期，生育後期は風速と同様に群落表面温度にはほとんど影響しない．すなわち，昼間の生育前期は気温の影響が少ない代わりに飽差の影響が大きいといえる．

夜間については全ての生育期間にわたって，気温の影響が強く，その他の飽差，純放射，風速はほとんど影響しない．

表 VI-15 時期別の標準重回帰式の比較
(1992 年畑)

06/28～07/07	(生育前期) 標準重回帰式	データ数
ダイズ トウモロコシ キャベツ	$Ts=4.75 Ta + 0.34 d + 6.39 Rn + 0.04 W + 23.68$	216
	$Ts=4.73 Ta + 0.04 d + 9.65 Rn + 0.08 W + 28.15$	216
	$Ts=4.17 Ta - 1.13 d + 7.03 Rn + 0.34 W + 23.39$	216
07/22～08/18	(生育中期) 標準重回帰式	データ数
ダイズ トウモロコシ キャベツ	$Ts=3.56 Ta - 0.04 d + 1.82 Rn + 0.01 W + 21.52$	312
	$Ts=3.19 Ta + 0.41 d + 1.46 Rn + 0.28 W + 21.79$	312
	$Ts=3.90 Ta - 0.69 d + 1.70 Rn + 0.11 W + 21.11$	312
08/21～09/11	(生育後期) 標準重回帰式	データ数
ダイズ トウモロコシ キャベツ	$Ts=3.64 Ta + 0.21 d + 1.81 Rn + 0.12 W + 20.63$	408
	$Ts=3.95 Ta + 0.02 d + 1.13 Rn + 0.25 W + 19.98$	408
	$Ts=3.94 Ta - 0.08 d + 1.70 Rn - 0.06 W + 19.61$	408

注：Ts:群落表面温度，Ta:気温，d:飽差，Rn:純放射，W:風速

4) 累積寄与率の比較

標準化回帰係数の大きさを基準に累積寄与率を計算した．全日の結果を表 VI-16 に示す．全ての期間とも 1 要素のみで 0.80 以上の寄与率を示し，2 要素を入れると 0.90 以上の寄与率を示す．また，全ての生育期間を通じて気温と純放射の 2 要素が寄与率に影響し，飽

差と風速は寄与率にほとんど影響しない。

また、昼・夜間別にも解析した。その結果、昼間は2要素以上は寄与率に影響しないのは全日と同じであるが、生育前期には純放射と飽差、生育中期と後期は気温と純放射である。夜間については同じように2要素以上は寄与率に影響しないが、第2位の気象要素は生育前期は純放射と風速、生育中期は飽差と風速、生育後期は風速で、全日や昼間と異なる。

表 VI-16 時期別の累積寄与率の比較
(1992年畑)

06/28～07/07	(生育前期) 気象要素 (累積寄与率)			
ダイズ トウモロコシ キャベツ	純放射 (0.88)	気温 (0.95)	飽差 (0.95)	風速 (0.95)
	純放射 (0.91)	気温 (0.95)	飽差 (0.95)	風速 (0.95)
	純放射 (0.85)	気温 (0.90)	飽差 (0.90)	風速 (0.90)
07/22～08/18	(生育中期) 気象要素 (累積寄与率)			
ダイズ トウモロコシ キャベツ	気温 (0.81)	純放射 (0.92)	飽差 (0.92)	風速 (0.92)
	気温 (0.80)	純放射 (0.91)	飽差 (0.92)	風速 (0.92)
	気温 (0.82)	純放射 (0.90)	飽差 (0.91)	風速 (0.91)
08/21～09/11	(生育後期) 気象要素 (累積寄与率)			
ダイズ トウモロコシ キャベツ	気温 (0.86)	純放射 (0.97)	飽差 (0.97)	風速 (0.97)
	気温 (0.90)	純放射 (0.95)	飽差 (0.95)	風速 (0.95)
	気温 (0.88)	純放射 (0.95)	飽差 (0.95)	風速 (0.95)

以上、時期別の特徴として、①生育初期が他の期と異なった反応を示し、群落表面温度は純放射の影響が気温の影響より大きい、②生育中期、後期は気温の影響が最も大きい、③重回帰式の寄与率や推定誤差は生育前期より中期、後期の方がよく、特に生育後期は良い、ことがいえる。

①の原因は生育初期は作物被覆率が少なく、群落表面温度は地表面温度を多く測定しているため、純放射の強弱が直接影響すると思われる。また③の原因は生育後期は生育初期より作物の被覆率が大きいこと、また生育中期より純放射や気温が低いため、群落表面温度の日変動が少ないためと思われる。

(2) 森林の群落表面温度と気象要素との時期別の解析

1) 単相関係数の比較

表 VI-17 に森林の時期別の単相関係数を示す。繁茂期(7月10日～9月15日)と落葉期(9月16日～10月31日)では単相関の特徴に特別な差異はなく、両期とも気温が最も単相関係数が大きく、次いで純放射である。また、気温は昼間より夜間の方が単相関係数は大きい。

表 VI-17.1 7月10日～9月15日(繁茂期)の単相関係数
(1992年森林)

区 分	気温	飽差	湿度	純放射	風速	データ数
全日のデータ	0.90**	0.47**	0.33**	0.69**	0.00	1536
昼間(9～15時)	0.88**	0.58**	0.46**	0.66**	0.26**	448
夜間(21～3時)	0.96**	0.22**	0.33**	0.50**	0.10*	448

** : 1%有意水準, * : 5%有意水準

表 VI-17.2 9月16日～10月31日(落葉期)の単相関係数
(1992年森林)

区 分	気温	飽差	湿度	純放射	風速	データ数
全日のデータ	0.92**	0.51**	0.36**	0.70**	0.28**	744
昼間(9～15時)	0.81**	0.46**	0.22**	0.59**	0.00	217
夜間(21～3時)	0.96**	0.00	0.26**	0.69**	0.44**	217

** : 1%有意水準, * : 5%有意水準

2) 重回帰式の比較

繁茂期と落葉期の重回帰分析の結果を表 VI-18 に示す。一般的に寄与率や推定値の標準誤差などは繁茂期の方が落葉期より良い。特に、落葉期の昼の回帰式は気温の回帰係数が小さく、また寄与率や推定値の標準誤差などが悪い。しかし、夜間の両期の気温の回帰係数や寄与率に大きな差はない。

3) 標準重回帰式の比較

気温、飽差などの説明変数を標準化して重回帰分析した結果を表 VI-19 に示す。表 VI-19 によると落葉期は繁茂期より気温の回帰係数

が全日と夜間で大きく，気温の影響が強いことが分かる．また，繁茂期は気温の回帰係数やその他の回帰係数の昼・夜間の差は，落葉期より小さく，昼・夜間の各気象要素の影響に差がないことが分かる．

表 VI-18.1 7月10日～9月15日（繁茂期）の重回帰式
(1992年森林)

区 分	回 帰 式	R ²	SD
全日のデータ	$Ts=1.04 Ta - 0.29 d + 10.66 Rn - 0.16 W - 2.94$	0.89	1.27
昼(9～15時)	$Ts=1.02 Ta - 0.14 d + 8.01 Rn - 0.49 W - 1.77$	0.85	1.51
夜(21～3時)	$Ts=1.08 Ta - 0.21 d + 22.16 Rn + 0.06 W - 4.04$	0.95	0.68

注：Ts:群落表面温度，Ta:気温，d:飽差，Rn:純放射，W:風速

表 VI-18.2 9月16日～10月31日（落葉期）の重回帰式
(1992年森林)

区 分	回 帰 式	R ²	SD
全日のデータ	$Ts=1.04 Ta - 0.40 d + 10.66 Rn - 0.08 W - 3.35$	0.89	1.67
昼(9～15時)	$Ts=0.87 Ta - 0.13 d + 5.97 Rn - 0.42 W - 0.11$	0.72	1.70
夜(21～3時)	$Ts=1.09 Ta - 0.33 d + 19.32 Rn + 0.15 W - 4.39$	0.95	1.01

注：Ts:群落表面温度，Ta:気温，d:飽差，Rn:純放射，W:風速

表 VI-19.1 7月10日～9月15日（繁茂期）の標準重回帰式
(1992年森林)

区 分	標 準 回 帰 式	データ数
全日のデータ	$Ts=2.98 Ta - 0.79 d + 1.64 Rn - 0.16 W + 15.19$	1536
昼(9～15時)	$Ts=2.85 Ta - 0.48 d + 1.40 Rn - 0.45 W + 18.23$	448
夜(21～3時)	$Ts=2.63 Ta - 0.46 d - 0.24 Rn + 0.06 W + 13.22$	448

注：Ts:群落表面温度，Ta:気温，d:飽差，Rn:純放射，W:風速

表 VI-19.2 9月16日～10月31日（落葉期）の標準重回帰式
(1992年森林)

区 分	標 準 回 帰 式	データ数
全日のデータ	$Ts=4.19 Ta - 0.88 d + 1.60 Rn - 0.10 W + 7.25$	744
昼(9～15時)	$Ts=2.36 Ta - 0.33 d + 0.89 Rn - 0.47 W + 11.96$	217
夜(21～3時)	$Ts=3.90 Ta - 0.27 d + 0.51 Rn + 0.16 W + 4.07$	217

注：Ts:群落表面温度，Ta:気温，d:飽差，Rn:純放射，W:風速

4) 累積寄与率の比較

繁茂期，落葉期の累積寄与率の比較を表 VI-20 に示す．単相関係数，重回帰分析および標準重回帰分析で見られたように，落葉期の昼の累積寄与率が小さく推定精度が悪いことが分かる．全日と夜間の累積寄与率の両期の差はほとんどない．また，2要素以上を使用しても累積寄与率の増加は少ない．

表 VI-20.1 7月10日～9月15日（繁茂期）の累積寄与率
（1992年森林）

区 分	気象要素（累積寄与率）			
全日のデータ	気温 (0.81)	純放射 (0.87)	飽 差 (0.89)	風速 (0.89)
昼 (9～15時)	気温 (0.78)	純放射 (0.83)	飽 差 (0.84)	風速 (0.85)
夜 (21～3時)	気温 (0.92)	純放射 (0.94)	飽 差 (0.95)	風速 (0.95)

表 VI-20.2 9月16日～10月31日（落葉期）の累積寄与率
（1992年森林）

区 分	気象要素（累積寄与率）			
全日のデータ	気温 (0.84)	純放射 (0.87)	飽 差 (0.89)	風速 (0.89)
昼 (9～15時)	気温 (0.66)	純放射 (0.70)	飽 差 (0.71)	風速 (0.72)
夜 (21～3時)	気温 (0.93)	純放射 (0.95)	飽 差 (0.95)	風速 (0.95)

以上，森林の時期別データの解析によって明らかになったことは，
① 森林では繁茂期（7月10日～9月15日）と落葉期（9月16日～10月31日）では単相関の特徴に特別な差異はなく，両期とも気温が最も単相関係数が大きく，次いで純放射である．② 一般的に寄与率や推定値の標準誤差などは繁茂期の方が落葉期より良い．③ 特に落葉期の昼間の回帰式は気温の回帰係数が小さく，また寄与率や推定値の標準誤差などが悪い．④ しかし，夜間の両期の気温の回帰係数や寄与率に大きな差はない．⑤ 落葉期は繁茂期より気温の回帰係数が全日と夜間で大きく，気温の影響が強いことが分かる．⑥ また，繁茂期は気温の回帰係数やその他の回帰係数の昼・夜間の差は，落葉期より小さく，昼夜の各気象要素の影響に差がないことが分かる．⑦ 全日と夜間の累積寄与率の両期の差はほとんどない．

畑と森林について被覆率によって時期別に区分すると、植生が多い時期には群落表面温度は気温の相関が大きくなり、気温の影響が大きいことが明らかになった。また、植生が多くなると寄与率や推定値の標準誤差が良くなり、回帰式によって精度良く推定できることを示している。逆に植生が少なくなると、純放射や他の気象要素の影響が強くなる。

これは植生が存在すると、純放射が蒸発散や葉温に影響し、さらに、この蒸発散の多寡や葉温の高低が群落表面温度に影響する。すなわち、純放射が直接的群落表面温度に影響するのではなく、ある程度植物の生理的影響が入る。そしてこの群落表面温度が影響して付近の気温を形成する。これに対して植生がないと、地表面温度は純放射の直接的な影響を受けて、これが接地気温に影響するためと思われる。

したがって、植生が多くなると純放射より気温の影響が強くなり、植生が少なくなると純放射の影響が強くなると思われる。また、植生が多くなると群落表面はより均一になり、相関係数や推定値の標準誤差が良くなると思われる。

3.3 畑の年別結果の比較

1992年および1993年の畑の群落表面温度と各気象要素との単相関係数、重回帰式、標準重回帰式、累積寄与率などを表 VI-21~24 に示した。

(1) 単相関係数の比較

表 VI-21.1 の1992年と1993年の全日の単相関係数を比較すると、ダイズ畑、トウモロコシ畑の1993年の単相関係数は気温より純放射の値が大きく、群落表面温度に純放射が大きく影響している。また、風速の単相関係数が1992年より1993が大きくなっている。その他については大きな差はない。

また、昼間の単相関係数については(表 VI-21.2), 1993年のダイ

ズ畑， トウモロコシ畑の気温の単相関係数が特に小さいく， トウモロコシ畑の飽差も1992年に比較して小さい．

夜間については(表VI-21.3)， 気温の単相関係数が他の気象要素より特に高いのは両年同じであるが， 1993年は飽差が高いのに対して1992年は純放射と風速が高い単相関係数を示している．

表 VI -21.1 晴天日全日の単相関係数の比較(畑)

1992年	作物畑	気温	飽差	湿度	純放射	風速	データ数
	ダイズ	0.89**	0.84**	0.77**	0.84**	0.40**	384
	トウモロコシ	0.82**	0.84**	0.77**	0.77**	0.33**	384
	キャベツ	0.85**	0.77**	0.73**	0.73**	0.35**	288
1993年	作物畑	気温	飽差	湿度	純放射	風速	データ数
	ダイズ	0.84**	0.79**	0.73**	0.89**	0.52**	288
	トウモロコシ	0.80**	0.74**	0.69**	0.89**	0.56**	288
	バレイショ	0.87**	0.74**	0.66**	0.87**	0.48**	288

** : 1%有意水準, * : 5%有意水準

表 VI -21.2 晴天日昼間の単相関係数の比較(畑)

1992年	作物畑	気温	飽差	湿度	純放射	風速	データ数
	ダイズ	0.76**	0.80**	0.70**	0.53**	0.24*	112
	トウモロコシ	0.71**	0.75**	0.68**	0.49**	0.17	112
	キャベツ	0.61**	0.66**	0.65**	0.46**	0.30**	84
1993年	作物畑	気温	飽差	湿度	純放射	風速	データ数
	ダイズ	0.50**	0.73**	0.77**	0.69**	0.46**	84
	トウモロコシ	0.28**	0.49**	0.57**	0.73**	0.55**	84
	バレイショ	0.68**	0.57**	0.49**	0.51**	0.14	84

** : 1%有意水準, * : 5%有意水準

表 VI -21.3 晴天日夜間の単相関係数の比較(畑)

1992年	作物畑	気温	飽差	湿度	純放射	風速	データ数
	ダイズ	0.91**	0.14	0.00	0.69**	0.51**	112
	トウモロコシ	0.95**	0.20*	0.00	0.57**	0.42**	112
	キャベツ	0.95**	0.10	0.00	0.73**	0.47**	84
1993年	作物畑	気温	飽差	湿度	純放射	風速	データ数
	ダイズ	0.96**	0.50**	0.30**	0.20*	0.10	84
	トウモロコシ	0.96**	0.49**	0.28**	0.24*	0.00	84
	バレイショ	0.93**	0.42**	0.22*	0.28**	0.00	84

** : 1%有意水準, * : 5%有意水準

(2) 重回帰式の比較

表 VI-22.1 の全日の重回帰式の比較では，1992年の純放射の回帰係数は，1993年より小さく，1993年のダイズ畑，トウモロコシ畑の気温の回帰係数は1より小さい．また，1993年のトウモロコシ畑，バレイショ畑の飽差の回帰係数は負を示している．さらに，風速の回帰係数は1992年が負であるのに対して，1993年は正である．

昼間の重回帰式の比較では(表 VI-22.2)，特に1993年の気温の回帰係数が小さく，純放射の回帰係数が大きいのが目だつ．飽差，風速の回帰係数の符号の特徴は全日と同じである．

夜間の重回帰式の比較では(表 VI-22.3)，ダイズ畑，キャベツ畑の1992年の純放射の係数が大きい．

全体的に寄与率(R^2)は1993年の方が大きく，また推定値の標準誤差(SD)も小さい．したがって，1993年のデータの方が1992年より精度が良いと考えられる．

表 VI-22.1 晴天日全日の重回帰式の比較(畑)

1992・作物畑	回 帰 式	R^2	SD
ダイズ	$Ts=1.17 Ta + 0.40 d + 10.75 Rn - 0.37 W - 3.07$	0.91	2.77
トウモロコシ	$Ts=1.18 Ta + 0.85 d + 8.52 Rn - 0.71 W - 3.25$	0.81	4.86
キャベツ	$Ts=1.22 Ta + 0.21 d + 13.10 Rn - 0.50 W - 3.74$	0.82	3.87
1993・作物畑	回 帰 式	R^2	SD
ダイズ	$Ts=0.96 Ta + 0.04 d + 21.49 Rn + 0.55 W - 0.82$	0.96	1.60
トウモロコシ	$Ts=0.96 Ta - 0.15 d + 21.81 Rn + 0.85 W - 0.97$	0.94	1.84
バレイショ	$Ts=1.30 Ta - 0.26 d + 20.19 Rn + 0.62 W - 6.51$	0.97	1.42

注：Ts:群落表面温度，Ta:気温，d:飽差，Rn:純放射，W:風速

表 VI-22.2 晴天日昼間の重回帰式の比較(畑)

1992・作物畑	回 帰 式	R^2	SD
ダイズ	$Ts=1.22 Ta + 0.50 d + 9.12 Rn - 0.51 W - 4.00$	0.75	3.89
トウモロコシ	$Ts=1.67 Ta + 0.93 d + 10.56 Rn - 0.06 W - 19.27$	0.65	7.34
キャベツ	$Ts=0.94 Ta + 0.34 d + 10.46 Rn - 0.84 W + 3.93$	0.50	5.93
1993・作物畑	回 帰 式	R^2	SD
ダイズ	$Ts=0.60 Ta + 0.22 d + 18.87 Rn + 0.73 W + 5.37$	0.84	1.87
トウモロコシ	$Ts=0.66 Ta - 0.07 d + 22.59 Rn + 0.99 W + 3.60$	0.71	2.57
バレイショ	$Ts=1.38 Ta - 0.35 d + 22.38 Rn + 1.38 W - 6.93$	0.81	1.90

注：Ts:群落表面温度，Ta:気温，d:飽差，Rn:純放射，W:風速

表 VI - 22.3 晴天日夜間の重回帰式の比較(畑)

1992・作物畑	回 帰 式	R ²	SD
ダ イ ズ トウモロコシ キャベツ	Ts=0.99 Ta - 0.31 d + 27.62 Rn + 0.67 W - 0.27	0.91	1.17
	Ts=1.10 Ta - 0.17 d - 0.67 Rn + 0.22 W - 0.25	0.92	0.95
	Ts=1.16 Ta - 0.29 d + 21.10 Rn + 0.37 W - 3.41	0.96	0.74
1993・作物畑	回 帰 式	R ²	SD
ダ イ ズ トウモロコシ バレイショ	Ts=1.00 Ta + 0.04 d + 10.61 Rn + 0.05 W - 0.87	0.94	0.69
	Ts=0.98 Ta - 0.04 d + 13.27 Rn + 0.23 W - 0.57	0.95	0.58
	Ts=1.13 Ta - 0.22 d + 15.19 Rn + 0.54 W - 4.07	0.93	0.80

注：Ts:群落表面温度, Ta:気温, d:飽差, Rn:純放射, W:風速

(3) 標準重回帰式の比較

表 VI - 23.1の全日の標準重回帰式の比較では, 1992年は気温の標準回帰係数が最も大きく, 群落表面温度に大きな影響を与える. しかし, 1993年ではダイズとトウモロコシは純放射の方が気温より標準回帰係数が大きく, 群落表面温度に大きな影響を与える.

昼間の重回帰式の比較では(表 VI - 23.2), 表 VI - 23.1の全日の標準重回帰式と同じ傾向である.

夜間の重回帰式の比較では(表 VI - 23.3), 1992年のダイズとトウモロコシの気温, 飽差および風速の標準回帰係数は1993年より大きい, 全体的には気温の標準回帰係数が他の気象要素の標準回帰係数より特に大きく, 群落表面温度に大きな影響を与えている.

表 VI - 23.1 晴天日全日の標準重回帰式の比較(畑)

1992・作物畑	標準回帰式	データ数
ダ イ ズ トウモロコシ キャベツ	Ts=4.85 Ta + 2.08 d + 2.72 Rn - 0.54 W + 21.90	384
	Ts=4.90 Ta + 4.40 d + 2.16 Rn - 1.05 W + 22.98	384
	Ts=4.71 Ta + 1.16 d + 3.36 Rn - 0.78 W + 22.37	288
1993・作物畑	標準回帰式	データ数
ダ イ ズ トウモロコシ バレイショ	Ts=3.79 Ta + 0.19 d + 4.08 Rn + 0.87 W + 21.07	288
	Ts=3.81 Ta - 0.74 d + 4.14 Rn + 1.34 W + 20.76	288
	Ts=5.15 Ta - 1.27 d + 3.84 Rn + 0.99 W + 19.89	288

注：Ts:群落表面温度, Ta:気温, d:飽差, Rn:純放射, W:風速

表 VI - 23. 2 晴天日昼間の標準重回帰式の比較(畑)

1992・作物畑	標準重回帰式	データ数
ダイズ	$Ts=3.23 Ta + 2.79 d + 1.44 Rn - 0.65 W + 31.70$	112
トウモロコシ	$Ts=4.43 Ta + 5.20 d + 1.67 Rn - 0.07 W + 33.38$	112
キャベツ	$Ts=2.45 Ta + 2.12 d + 1.75 Rn - 1.11 W + 31.78$	84
1993・作物畑	標準重回帰式	データ数
ダイズ	$Ts=1.19 Ta + 1.08 d + 2.26 Rn + 1.16 W + 30.24$	84
トウモロコシ	$Ts=2.13 Ta - 0.34 d + 2.70 Rn + 1.56 W + 29.39$	84
バレイショ	$Ts=4.44 Ta - 1.73 d + 2.68 Rn + 0.48 W + 28.83$	84

注：Ts:群落表面温度, Ta:気温, d:飽差, Rn:純放射, W:風速

表 VI - 23. 3 晴天日夜間の標準重回帰式の比較(畑)

1992・作物畑	標準重回帰式	データ数
ダイズ	$Ts=2.79 Ta - 0.47 d + 0.65 Rn + 0.86 W + 15.24$	112
トウモロコシ	$Ts=3.10 Ta - 0.25 d - 0.02 Rn + 0.28 W + 16.01$	112
キャベツ	$Ts=2.88 Ta - 0.48 d + 0.53 Rn + 0.49 W + 15.55$	84
1993・作物畑	標準重回帰式	データ数
ダイズ	$Ts=2.62 Ta + 0.08 d + 0.26 Rn + 0.06 W + 14.51$	84
トウモロコシ	$Ts=2.56 Ta - 0.09 d + 0.32 Rn + 0.26 W + 14.50$	84
バレイショ	$Ts=2.97 Ta - 0.47 d + 0.37 Rn + 0.60 W + 13.38$	84

注：Ts:群落表面温度, Ta:気温, d:飽差, Rn:純放射, W:風速

(4) 累積寄与率の比較

表 VI - 24. 1～24. 3の1992年と1993年の比較では, 1992年が全日, 昼間, 夜間によって気象要素の影響順位が異なるが, 1993年は全日, 昼間, 夜間ともほとんどが影響順位が同じで, 純放射, 気温が第2位までに入っており, しかも第2位までの累積寄与率が高い. 特に両年で異なるのは晴天日昼間のトウモロコシ畑の影響順位で1992年は飽差が第1位であるが, 1993年は第4位で最も影響が少ない.

1992年と1993年の相違の要約は, ①1993年は1992に比較して純放射の影響が気温の影響より大きい. ②また, 1993年は全体の寄与率や推定値の標準誤差が良く, 重回帰式によって精度良く表される. ③これに対して, 1992年は全日, 昼間, 夜間別や作物別の重回帰式の差, 影響順位などの変動が大きい.

表 VI - 24.1 晴天日全日の累積寄与率の比較(畑)

1992・作物畑	気象要素(累積寄与率)			
ダイズ トウモロコシ キャベツ	気温 (0.80)	純放射 (0.88)	飽差 (0.90)	風速 (0.91)
	気温 (0.68)	飽差 (0.79)	純放射 (0.80)	風速 (0.81)
	気温 (0.73)	純放射 (0.81)	飽差 (0.81)	風速 (0.82)
1993・作物畑	気象要素(累積寄与率)			
ダイズ トウモロコシ バレイショ	純放射 (0.79)	気温 (0.95)	風速 (0.96)	飽差 (0.96)
	純放射 (0.80)	気温 (0.92)	風速 (0.94)	飽差 (0.94)
	気温 (0.75)	純放射 (0.95)	風速 (0.96)	飽差 (0.97)

表 VI - 24.2 晴天日昼間の累積寄与率の比較(畑)

1992・作物畑	気象要素(累積寄与率)			
ダイズ トウモロコシ キャベツ	気温 (0.58)	飽差 (0.72)	純放射 (0.74)	風速 (0.75)
	飽差 (0.57)	気温 (0.64)	純放射 (0.65)	風速 (0.65)
	気温 (0.37)	純放射 (0.47)	飽差 (0.48)	風速 (0.50)
1993・作物畑	気象要素(累積寄与率)			
ダイズ トウモロコシ バレイショ	純放射 (0.47)	気温 (0.77)	風速 (0.82)	飽差 (0.84)
	純放射 (0.53)	気温 (0.64)	風速 (0.71)	飽差 (0.71)
	気温 (0.46)	純放射 (0.76)	飽差 (0.80)	風速 (0.81)

表 VI - 24.3 晴天日夜間の累積寄与率の比較(畑)

1992・作物畑	気象要素(累積寄与率)			
ダイズ トウモロコシ キャベツ	気温 (0.83)	風速 (0.86)	純放射 (0.90)	飽差 (0.91)
	気温 (0.91)	風速 (0.92)	飽差 (0.92)	純放射 (0.92)
	気温 (0.91)	純放射 (0.94)	風速 (0.95)	飽差 (0.96)
1993・作物畑	気象要素(累積寄与率)			
ダイズ トウモロコシ バレイショ	純放射 (0.96)	気温 (0.97)	風速 (0.97)	飽差 (0.97)
	純放射 (0.96)	気温 (0.97)	風速 (0.97)	飽差 (0.97)
	気温 (0.93)	純放射 (0.94)	風速 (0.96)	飽差 (0.96)

これらの違いについては、今後の研究に待つところが多いが、考えられることは、①については、1993年は作物の生育が悪く、特にダイズ畑の生育は悪く被覆率は小さかった。植生が充分でない場合、生育時期別の項で見られたように、純放射の影響が大きく現れる。特に、昼間の純放射の影響が大きい。このことが1993年の解析結果に現れたと思われる。②、③については、1993年は1992年に比較し

て2年目であるため，測定技術の向上などが考えられるが，天候の違いなども影響しているかもしれない．このことは今後さらに解析する必要がある．

第4節 まとめ

群落表面温度がどのような気象要素に影響を受けるか解析した．熱収支式の解析では群落表面温度は気温，純放射，飽差，風速などの影響を受けるが，次のようなことが要約された．

① 群落表面温度と気温，純放射，飽差，風速との単相関係数はいずれも有意性がある．② ダイズ畑，キャベツ畑の重回帰分析では群落表面温度は気温，純放射の順で影響する．③ トウモロコシ畑の群落表面温度は気温，飽差の順で影響し，気象要素との関係は他の畑と異なる．④ 各畑とも群落表面温度は，2つの気象要素で76～89%まで説明できる

昼・夜間別の解析では，① 昼間は気温，純放射，飽差などが群落表面温度に影響するが，夜間は気温のみの影響が大きい．② 昼間より夜間の推定値の標準誤差が小さく，回帰式による推定精度が良い．③ 昼間は作物によって気象要素の影響程度が異なるが，夜間は作物による各気象要素の影響程度の差は小さい．

森林の解析では，① 森林は畑より気温の影響が大きい．② 気温の昼・夜間の差は畑より大きくない．

時期別の解析では，① 作物の生育初期は生育中期，後期と異なった反応を示し，群落表面温度は純放射の影響が気温の影響より大きい，② 作物が繁茂した生育中期，後期は気温の影響が最も大きい，③ 重回帰式の寄与率や推定誤差は生育前期より中期，後期の方がよく，特に生育後期は良い．

森林の時期別データの解析によって明らかになったことは，① 森林では繁茂期と落葉期では単相関の特徴に特別な差異はなく，両期とも気温が最も単相関係数が大きく，次いで純放射である．② 一般

的に寄与率や推定値の標準誤差などは繁茂期の方が落葉期より良い。
③特に落葉期の昼間の回帰式は気温の回帰係数が小さく、また寄与率や推定値の標準誤差なども悪い。

1992年と1993年の相違の要約は、①1993年は1992に比較して純放射の影響が気温の影響より大きい。②また、1993年は全体の寄与率や推定値の標準誤差がよく、重回帰式によって精度良く表される。
③これに対して、1992年は全日、昼間、夜間や作物別の重回帰式、影響順位などの変動が大きい。

以上の結果によって、一般的に要約できることは、①群落表面温度と気温、純放射、飽差との間に有意な相関が良い。②昼間の群落表面温度は気温・純放射・飽差などの気象要素の影響を受けるが、夜間は気温のみの影響が大きい。③植生が少ない内は群落表面温度は純放射の影響が強い、植生が多くなると群落表面温度は気温の影響が大きくなる、したがって、群落表面温度は気温によって精度良く推定できる。

群落表面温度は植物葉や土壌面などを含んだ不均一な面を測定している。したがって、測定面に植生が繁茂したり、日射が無く均一な状態になると、群落表面温度は気温のみの相関が強くなる。逆に、植生が少なく土壌面を多く測定したり、日射が当たっている所を測定している場合は、群落表面温度に純放射と気温の影響が現われると考えられる。

第Ⅶ章 群落表面温度と植生指数の関係

第 VII 章 群落表面温度と 植生指数の関係

第1節 はじめに

群落表面温度の利用の1つとして、群落表面温度と植生指数の関係について解析を行った。植生が多くなると群落表面温度が低くなることは、第IV、V、VI章などで観測された。したがって、群落表面温度と植生との間には一定の関係があることが伺える。そしてこの関係が種々な地上の熱的關係の解析に使用できると思われる。そのため群落表面温度と植生との関係を解析することは、群落表面温度を利用するためにも大切なことである。

群落表面温度と植生指数の関係については、Hopeら(1986)、Ramakrishnaら(1989)、王ら(1991)、Hopeら(1992)および堀口ら(1993)が研究している。

Hopeら(1986)は群落の表面温度と植生指数の関係は蒸発散に有用な表面水分を係数化するのに有用であると報告している。Ramakrishnaら(1989)は衛星ノア/AVHRRの表面温度データと植生指数を使用して、地域的蒸発散のための群落表面の抵抗係数を推定している。さらに、高い植生指数がある地点で衛星データから気温や飽差などが推定できるとしている。王ら(1991)は北海道のサロベツ原野のランドサットデータの解析から、群落表面温度と植生指数の回帰係数は、夏季においては年による変動は少なくほぼ一定であるとしている。Hopeら(1992)は群落表面温度と植生指数の間の回帰係数を利用して、草地における火入れとその他の地勢の影響などを解析した。さらに、堀口ら(1993)は中国大興安嶺の森林火災の回復状態は群落表面温度と植生指数の回帰係数で表現でき、この年変化から森林回復年が予想できると解析している。このように群落表面温度と植生指数の関係は種々な関係に利用できる。

この章は群落表面温度と植生指数の回帰係数が年による変動が少

なく，種々な現象のパラメータとして利用できることに着目して，両者の基本的な関係を解析した．

第2節 観測方法および解析方法

2.1 植生指数の定義と観測方法

光合成活動を行っている植物の葉は，太陽光の照射に対して極めて特徴のある反射スペクトル特性を示す．特に，植生指数は，一般に植物の最小反射波長域（赤色部ークロロフィルの吸収波長帯で $0.63 \sim 0.69 \mu\text{m}$ ）と，最大反射波長域（近赤外で $0.75 \sim 0.90 \mu\text{m}$ ）の反射エネルギーの比や差で表される．これは植物の活性が衰えると赤色域の反射量に対して，近赤外域の反射量が変化するためである．すなわち，植生指数は植物の活性などを示すパラメータである．

この植生指数の概念は衛星データで地上からの反射を波長別測定するようになってから導入されたものである．植生指数については種々な計算法が提案され，また使用されている．しかし，最も一般的な計算式は（Ⅶ.1）式で示される．本研究も（Ⅶ.1）式の植生指数を使用した．

$$\text{植生指数} = (\text{近赤外反射量} - \text{赤色反射量}) / (\text{近赤外反射量} + \text{赤色反射量}) \quad (\text{Ⅶ.1})$$

植生指数の測定は1992年と1993年の2年間北大農場のダイズ畑，トウモロコシ畑，キャベツ畑およびバレイショ畑の4種類の畑で行った．また，1992年苫小牧演習林の森林（広葉樹）でも行った．

使用した測定器と測定法は，次のとおりである．

1992年：スペクトルラジオメータ（SRW-465B飯尾電気KK）を使用し，
650nm（赤色）と700nm（近赤外）の測定値を用いて植生指数を計算した．測定は手動で行い，測定時間は9時30分，12時

30分，15時30分である．

1993年：三色光量子モニター(SY-102型日本真空光学株式会社)を使用し，600～700nm(赤色)と700～900nm(近赤外)の反射エネルギー測定値を用いて植生指数を計算した．測定は，自動と手動の2つの手段で行った．すなわち，各畑の一日の変化については自動で，手動の時は9時30分，12時30分，15時30分に行った．

なお，解析は1993年の自動的のデータは15分ごとの平均値で，1992年と1993年の手動のデータは各測定の3回ずつの平均値を利用した．

2.2 被覆率および葉面積指数の測定

植生指数は衛星で地上の反射率を波長別に測定するようになってから導入された概念である．したがって，植生指数が従来使用されていた被覆率や葉面積指数とどのような関係にあるか調べる必要がある．そのため被覆率を1992,1993年の両年にダイズ畑，トウモロコシ畑，キャベツ畑，バレイショ畑および森林について生育期間中に5～13回測定した．また，葉面積指数を1992年にダイズ畑とトウモロコシ畑で6～8回測定した．

被覆率の測定は第IV章で測定した値である．すなわち，畑は2.5m上から赤外線フィルムで撮影し，スキャナで作物部分を読み取り求めた．森林は林床から赤外線フィルムで撮影し，スキャナで葉や樹木部分を読み取り求めた．また，葉面積指数は1992年ダイズとトウモロコシ畑について，代表的な各作物の5本を採取して，スキャナで葉の部分の面積を読み取り求めた．

2.3 群落表面温度の観測方法および解析項目

群落表面温度の測定は，1992年はミノルタ社製の放射温度計(MINOLTA 0510)を用いて，植生指数測定と同時に行った．植生指数を測定した周辺の作物表面温度と土壌表面温度データを10個ずつを

取って、その平均値を群落表面温度として使用した。森林は代表的な20点の平均値を森林の表面温度として使用した。

1993年の作物群落表面温度のデータは第IV章の解析に使用した群落表面温度データを使用した。すなわち、測定間隔15分(畑)と10分(森林)の1時間平均値である。

解析項目はまず植生指数の基本的な性質である①植生指数の日変化について解析し、さらに従来から使用されている被覆率や葉面積指数を用いて②植生指数と被覆率、葉面積指数の関係、さらに作物別に③植生指数の季節変化について解析した。

次いで各畑の群落表面温度と植生指数の関係について解析し、第VI章の群落表面温度と気象要素の関係に植生指数を導入し、④群落表面温度と気象要素および植生指数の関係について解析した。さらに、⑤群落表面温度と植生指数との回帰係数に着目して解析を行った。

第3節 結果および考察

3.1 植生指数の特徴と被覆率、葉面積指数の関係

(1) 植生指数の日変化

植生の波長別反射光は日変化することは良く知られているため、植生指数も日変化することが予想される。また、植生指数は衛星データから計算されることが多い。そのため衛星通過時間の植生指数が一日の植生指数の変化とどのような関係にあるかを知る必要がある。

そのため1993年の自動記録データから植生指数の日変化を調べた。トウモロコシ畑の典型的な結果を図VII-1, 2に示す。6月09日は被覆率が9.2%で、7月28日は被覆率90.0%の時の植生指数の日変化で、両グラフとも朝夕にピークがある日変化をしている。しかし、被覆率が小さい6月09日のグラフは日中の植生指数に比較して朝夕のピ

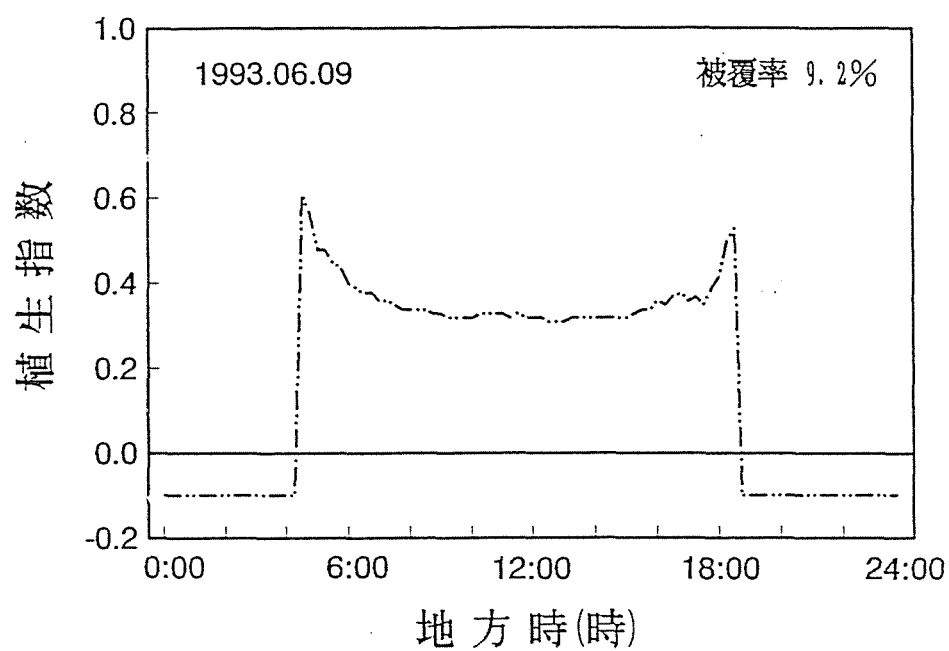


図 VII -1 トウモロコシ畑の植生指数の日変化
(1993.06.09)

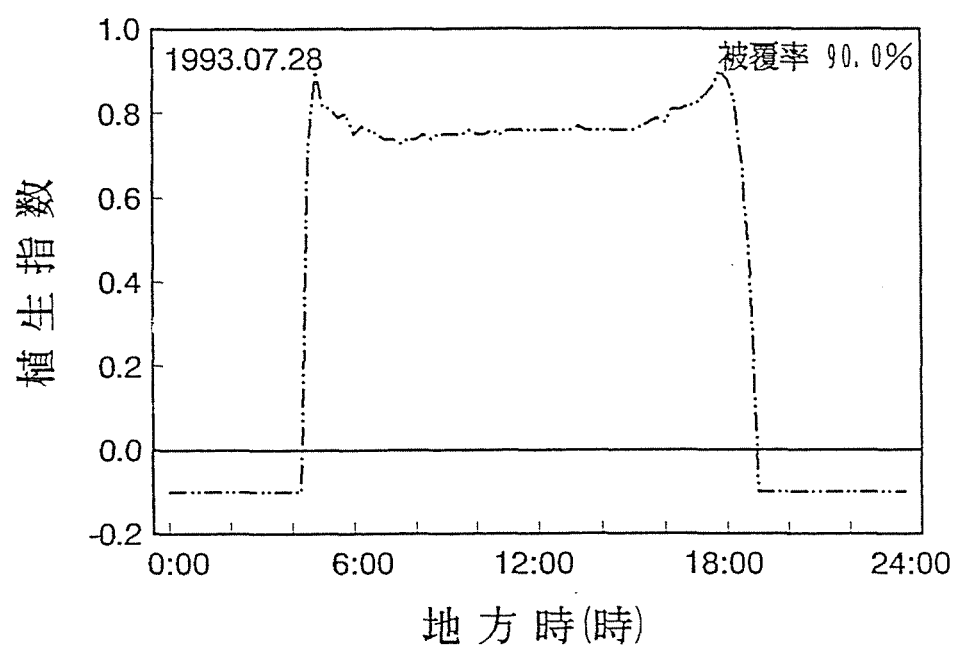


図 VII -2 トウモロコシ畑の植生指数の日変化
(1993.07.28)

ーク値が大きく、日中はナベ底のような曲線をしているが、被覆率が大きい7月28日のグラフは朝夕のピーク値が日中の植生指数に比較して小さくなく、日中はほぼ一定で平坦な値を示している。このような傾向はダイズ畑やバレイショ畑においても見られた。これは被覆率が小さい内は平坦な土壌面の反射を測定しているため朝夕に鏡面反射があるが、被覆率が大きくなると植生による乱反射のため鏡面反射が起らないと思われる。

したがって、植生指数の測定時間による変化は植生指数が小さい時大きく、植生指数が大きくなると時間変化が少なくなるといえる。そのため植生指数は日中の変化の少ないときに測定するのが望ましい。

(2) 植生指数と被覆率、葉面積指数の関係

1993年のトウモロコシ畑と1992年の森林における植生指数と被覆率の関係を図VII-3,4に示す。図VII-3,4の植生指数は日変化が少ない12:30のデータである。植生指数と被覆率の間に非常に高い相関関係があるが、直線回帰で表すには変動が大きい。これは植生指数は植物の活性を表す係数であるが、被覆率は植物の物理的な状態を表すためと思われる。後に示すごとく(図VII-7参照)生育後期になって作物の活性が落ち植生指数が小さくなっても、被覆率は変化しないことが見られる。被覆率と同じように植生指数と葉面積指数の関係を調べた。農業関係の研究者は作物の生育調査時に、必ず葉面積指数を調べる。これは葉面積指数が光合成の指標として用いられているためである。

1992年のトウモロコシ畑とダイズ畑における12時30分の植生指数と葉面積指数の解析結果を図VII-5,6に示す。寄与率についてダイズ畑は0.84で、トウモロコシ畑は0.45である。これは1992年のトウモロコシ畑の生育がよくなかったためと思われる。2種類の畑の解析結果から植生指数は葉面積指数と相関関係があるが、被覆率と同じように直線回帰で表すには変動が大きい。図VII-5において回帰式

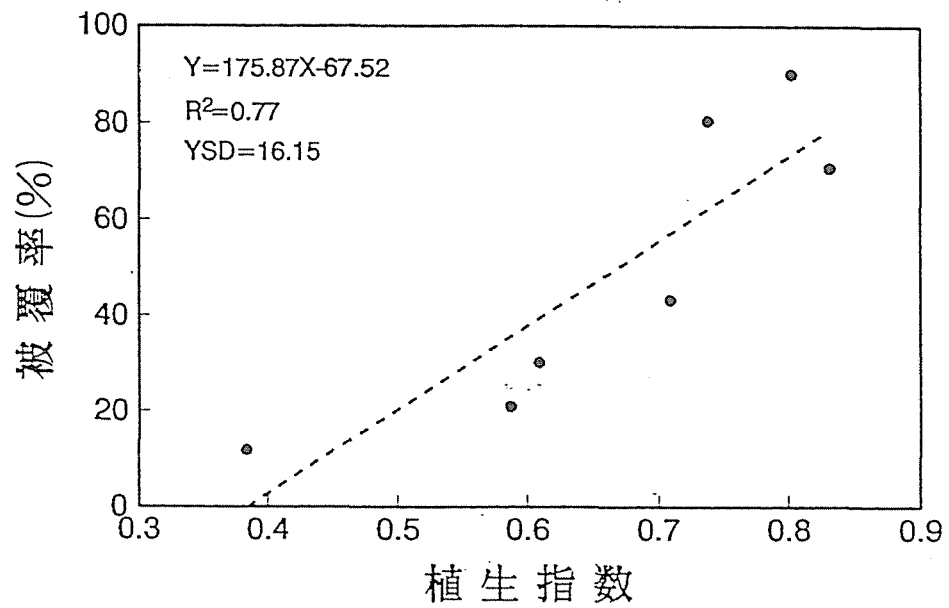


図 VII-3 トウモロコシ畑における植生指数と被覆率の関係
(1993年)

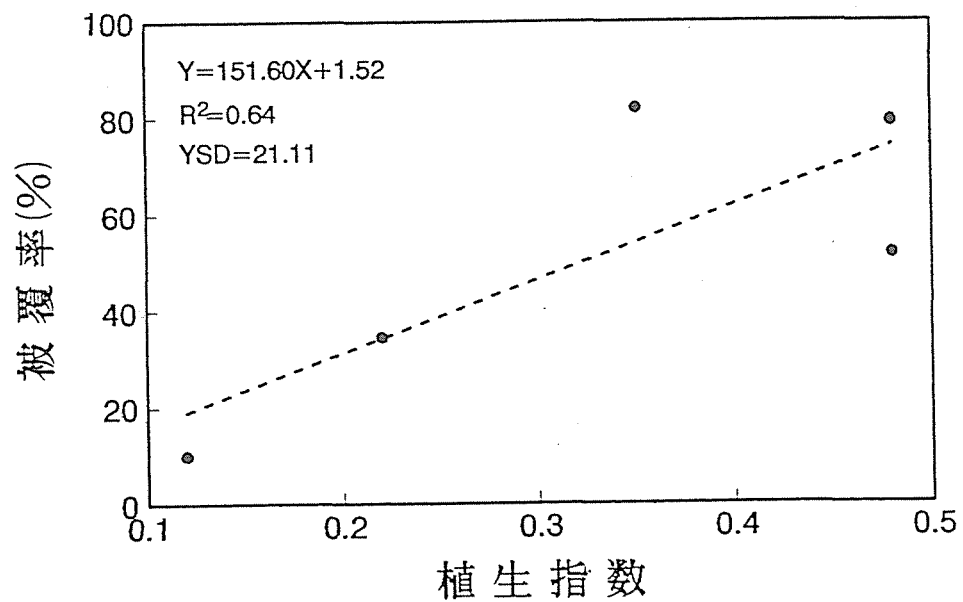


図 VII-4 森林における植生指数と被覆率の関係
(1992年)

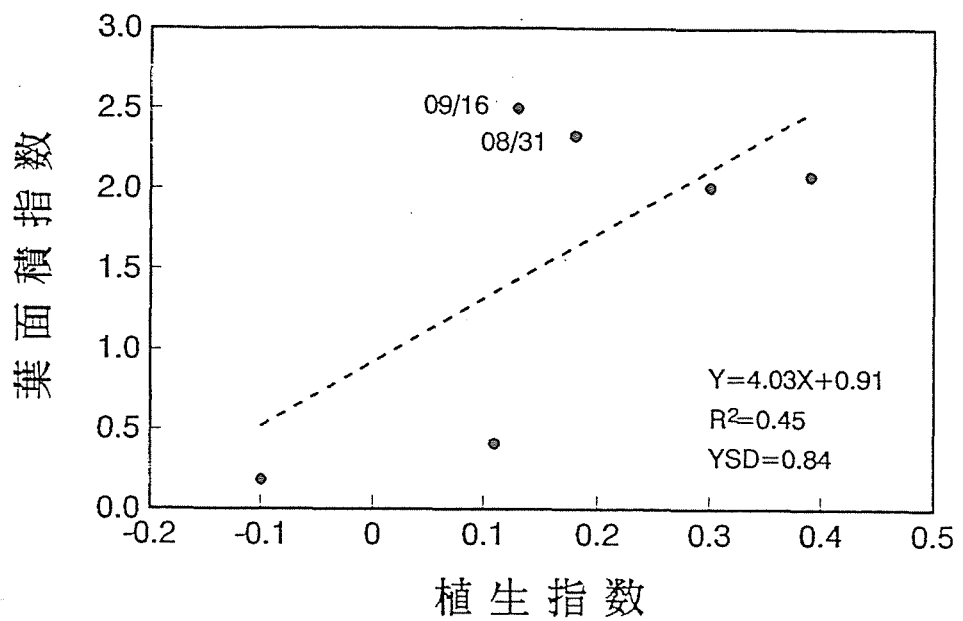


図 VII-5 トウモロコシ畑における植生指数と葉面積指数の関係
 (1992年 12時30分)

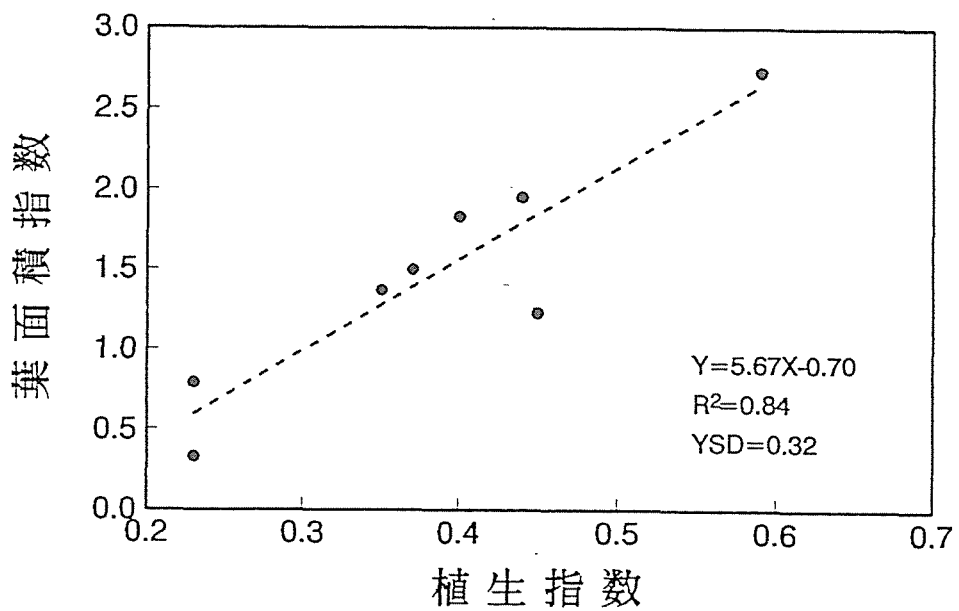


図 VII-6 ダイズ畑における植生指数と葉面積指数の関係
 (1992年 12時30分)

からの偏差が大きい点を調べた結果、トウモロコシでは生育後期の8月26日、9月16日である。トウモロコシは生育が良くなかったため、8月26日以降は作物の活性が落ち植生指数が低下したと思われる。ダイズは生育が良く、生育途中の第1回間引き後(7月03日以降)は9月14日まで植生指数と葉面積指数の関係はほぼ直線である。

植生指数と葉面積指数の関係はHopeら(1986)やRamakrishna(1989)も調べている。それらによると植生指数と葉面積指数はかならずしも直線関係にないことを報告している。

(3) 植生指数の季節変化

1992年と1993年の各畑および1992年の森林の植生指数の推移を図VII-7, 8, 9に示す。各畑の植生指数は12時30分のデータで、森林は15時30分のデータである。1992年の畑の図VII-7と、被覆率の季節変化を示した図IV-1を比較した。畑では植生指数や被覆率が増加している生長期には両者は同じような変化を示しているが、生育後期には異なった変化を示している。たとえば、トウモロコシ畑では被覆率は231日(8/18)から260日(9/16)まで一定値を示しているが、植生指数の方はこの期間低下している。この傾向はダイズやキャベツでも見られる。この理由は生育後期には作物の光合成などの活性が落ちるため、植生指数が低下するのに対して、葉面積は変化しないためと思われる。

ダイズ畑とトウモロコシ畑の被覆率と植生指数の季節変化はTuckerら(1979)も調べている。これによると生育前期の被覆率と植生指数の関係と生育後期の被覆率と植生指数の関係が異なることを報告している。

また、森林の植生指数の変化を示した図VII-9と、被覆率の季節変化を示した図IV-1を比較した。被覆率の方は169日(6/17)から268日(9/24)までの夏季の期間は一定であるが、植生指数は低下している。この理由も樹木の活性に関係があると思われる。

以上の結果、植生指数は被覆率や葉面積指数と相関が強いが、必

ずしも直線関係にはならないことがわかった。

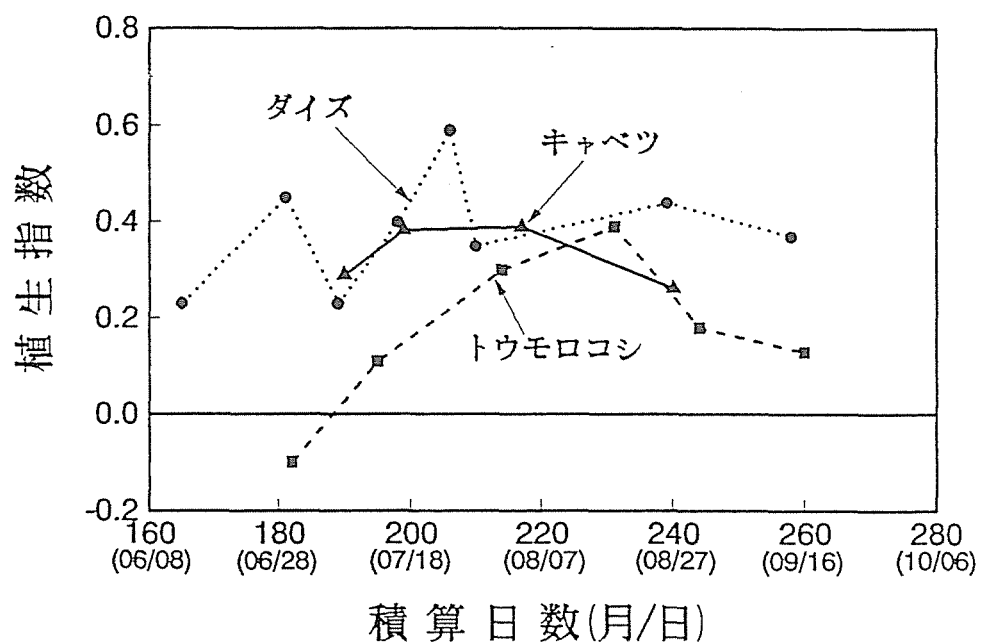


図 VII -7 1992年畑における植生指数の推移

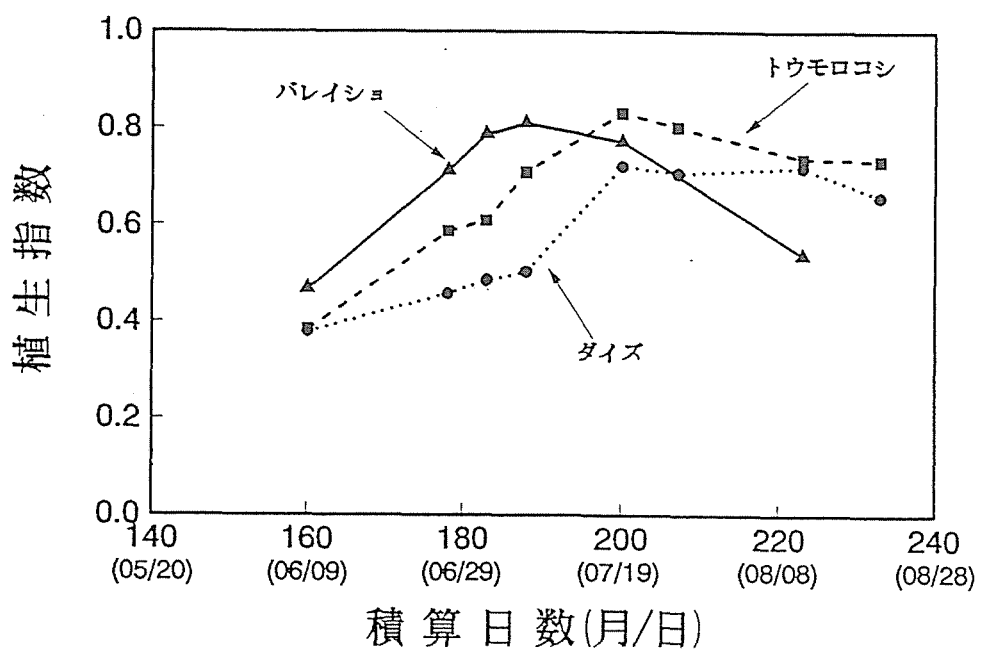


図 VII -8 1993年畑における植生指数の推移

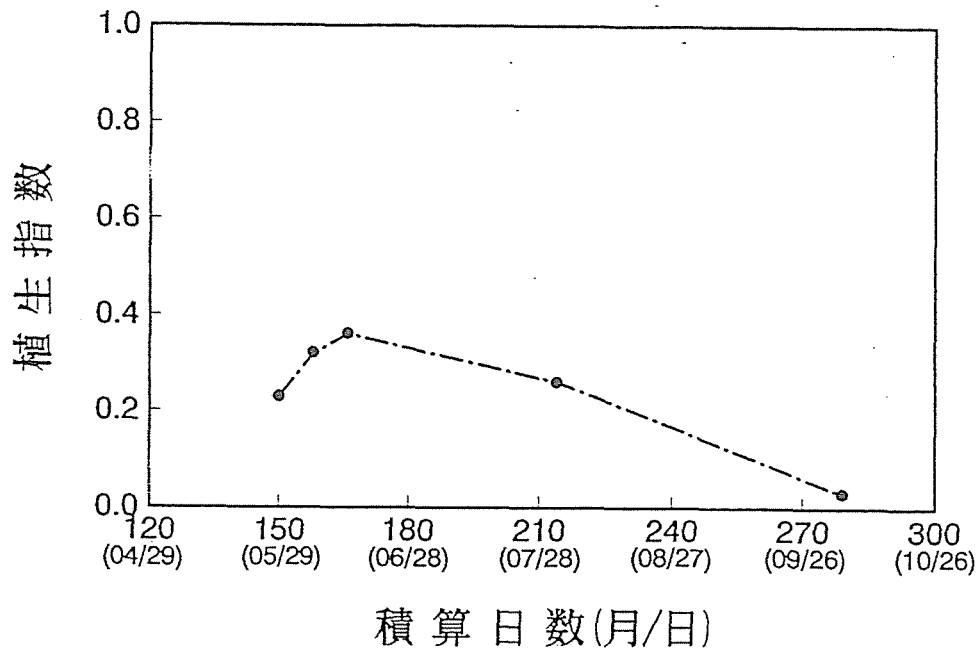


図 VII-9 1992年森林における植生指数の推移

3.2 群落表面温度と植生指数の関係

(1) 群落表面温度と気象要素および植生指数の関係

第VI章で群落表面温度と気象要素の関係について解析した。その結果、生育時期によって群落表面温度と気象要素の関係が異なることが判明した。そのため植生指数を群落表面温度と気象要素の関係に導入した場合、より正確に群落表面温度を表現できることが予想される。そのため第VI章の3.3で使用した晴天日の全日のデータに植生指数を説明変数に加えて、群落表面温度と気象要素、植生指数との標準回帰係数を求めた。植生指数の測定値がない日については比例によって求め、また同一日(夜間も)は同一植生指数を用いた。その結果を表VII-1に示す。

表VII-1と植生指数が入っていない表VI-22.1と比較すると、寄与率は1992年のダイズを除いていずれも同じか良くなっている。また、推定値の標準誤差はすべて小さくなっており、推定精度が良いことを示している。すなわち、植生指数を群落表面温度と気象要素の関係に入れると、より正確に群落表面温度を説明できることを示している。

表 VII-1 群落表面温度と気象要素，植生指数との
標準回帰係数（晴天全日）

1992年	標準回帰式	R ²	SD
ダイズ トウモロコシ キャベツ	Ts=6.03Ta +2.06d +2.47Rn -0.14W -2.74VI +22.98	0.85	4.37
	Ts=4.69Ta +2.57d +2.41Rn -0.39W +0.98VI +21.90	0.92	2.61
	Ts=5.34Ta +0.04d +3.37Rn -0.40W -2.24VI +21.19	0.86	3.43
1993年	標準回帰式	R ²	SD
ダイズ トウモロコシ バレイショ	Ts=4.46Ta -0.61d +3.84Rn -0.93W -1.18VI +20.70	0.96	1.59
	Ts=4.29Ta -0.07d +4.02Rn +0.71W -0.57VI +21.02	0.96	1.54
	Ts=4.51Ta -0.49d +3.81Rn +1.02W -0.63VI +19.84	0.97	1.36

注：Ts：群落表面温度，Ta：気温，d：飽差，Rn：純放射，W：風速，VI：植生指数

表 VII-1 と標準回帰式の表 VI-23.1 と比較すると，1992年のトウモロコシ畑を除いて，気温の標準回帰係数が大きくなっており，また1993年のダイズ畑を除いて飽差の標準回帰係数が小さくなっている。すなわち，植生指数を入れることにより気温の影響が強くなり，飽差の影響が小さくなる。これは植生指数が後に示すごとく蒸発散に関係するため，両気象要素の標準回帰係数が影響されたと思われる。

また，植生指数の標準回帰係数は1992年のトウモロコシ畑を除いて，負を示し植生指数が大きくなると，群落表面温度は低くなる一般的概念と一致する。しかし，1992年，1993年トウモロコシ畑および1993年バレイショ畑は植生指数の標準回帰係数は大きくない。

(2) 群落表面温度と植生指数との回帰係数

サロベツ原野における王ら(1991)の研究によると，原野内の群落表面温度と植生指数との回帰係数は年による変動が小さいと報告している。また，この回帰係数は蒸発散に関係するパラメータになることをRamakrishnaら(1989)は発表している。このように群落表面温度と植生指数との回帰係数は地表の種々な熱的現象のパラメータになることが予想される。そのため植生指数を測定した日について両者の関係を解析した。

図 VII-10 に1992年のダイズ畑の群落表面温度と植生指数の関係を示す。また，表 VII-2 に各畑の群落表面温度と植生指数の関係を示す。

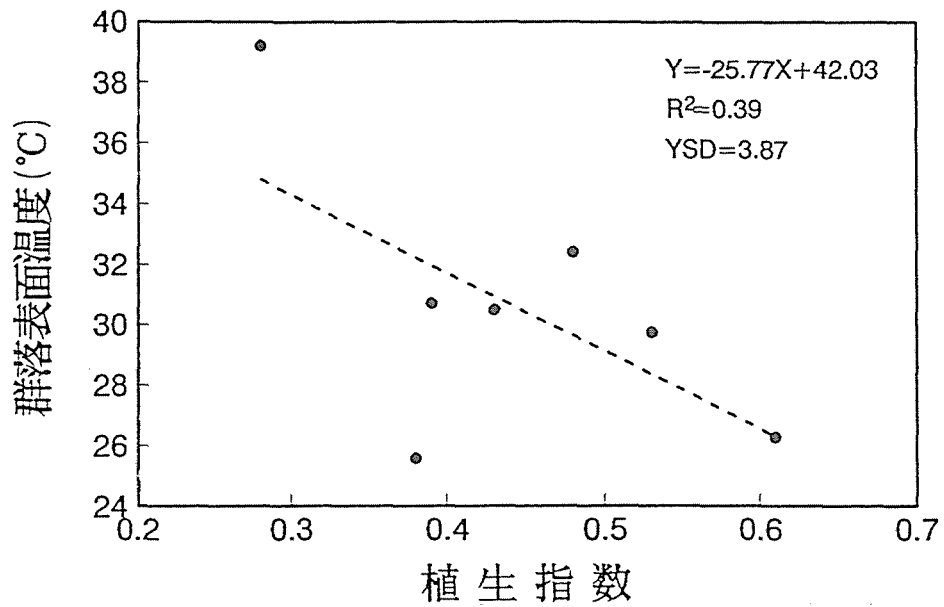


図 VII -10 群落表面温度と植生指数の関係
(1992年 ダイズ畑)

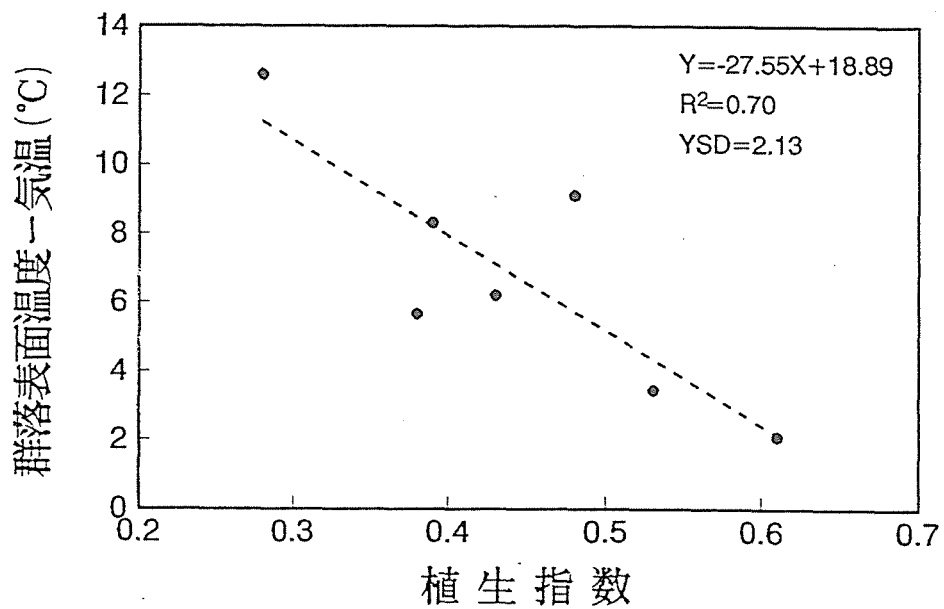


図 VII -11 群落表面温度-気温と植生指数の関係
(1992年 ダイズ畑)

データ数が少ないため変動が大きく，1992年と1993年には一定の関係が見られない．これは1992年と1993年の群落表面温度の相違も影響していると思われる．そのため，群落表面温度－気温と植生指数の関係を調べた．図Ⅶ-11に1992年のダイズ畑の群落表面温度－気温と植生指数の関係を示す．また，表Ⅶ-3に各畑の群落表面温度－気温と植生指数の関係を示す．表Ⅶ-3の寄与率や推定誤差は表Ⅶ-2の寄与率や推定値の標準誤差より向上している．

表Ⅶ-3によるとダイズ畑の1992年と1993年の回帰係数は近似である．また，トウモロコシ畑の回帰係数は両年ともダイズ畑より負値で大きく，似たような値を示している．王ら(1991)の結果と合わせて考えると，作物の種類によって回帰係数が異なることが予想できる．そしてトウモロコシ畑の群落表面温度－気温と植生指数の間の回帰係数は，ダイズ畑より大きいといえる．

表Ⅶ-2 群落表面温度と植生指数との関係

年 別	測定対象	寄与率	回帰係数	定数項	標準誤差	データ数
1992年	ダイズ	0.39	-25.8	42.03	3.87	7
	トウモロコシ	0.64	-43.6	35.66	5.02	6
	キャベツ	0.84	-55.9	50.85	2.45	4
	コムギ	0.75	-23.1	35.39	4.33	4
	広葉樹	0.61	-17.0	23.22	3.41	5
1993年	ダイズ	0.57	-21.31	44.20	2.66	6
	トウモロコシ	0.32	-24.02	46.55	3.92	7
	ハレソヨ	0.24	-16.81	41.44	3.76	5

表Ⅶ-3 群落表面温度－気温と植生指数との関係

	測定対象	寄与率	回帰係数	定数項	標準誤差	データ数
1992年	ダイズ	0.70	-27.6	18.95	2.13	7
	トウモロコシ	0.84	-39.8	12.17	2.63	6
	キャベツ	0.81	-57.2	26.95	2.70	4
	コムギ	1.00	-31.7	21.96	0.33	4
	広葉樹	0.83	-23.8	12.92	2.03	5
1993年	ダイズ	0.87	-28.1	27.45	1.55	6
	トウモロコシ	0.80	-47.4	41.75	2.38	7
	ハレソヨ	0.78	-26.3	27.68	1.76	5

トウモロコシ畑の回帰係数がダイズ畑の回帰係数より大きいことは、トウモロコシ畑はダイズ畑より植生指数の小さいときに比較して、植生指数が大きくなると群落表面温度が低くなることを意味している。この結果は第Ⅳ章の3.4の結果と一致する。すなわち、トウモロコシ畑の最高温度は生育後期にはダイズ畑より低いことが観測された。したがって、この回帰係数は作物体系や葉の着生に影響されるパラメータであると思われる。第Ⅴ章で見られたようにダイズの葉は作物の上部に着生し、そのため下部まで葉が着生するトウモロコシに比較して同じ植生指数でも群落表面温度は高くなる。その結果、回帰係数はトウモロコシ畑の方がダイズ畑より回帰係数は大きくなる。

年による群落表面温度の高低を何等かの方法で消去すると、群落による固有のパラメータになることが考えられる。このパラメータは衛星データの作物の識別、作物の年による生育状況の違い、植物の活性(蒸発散)などに使用できることが考えられる。

堀口ら(1993)は中国大興安嶺の森林について、群落表面温度を標準化(平均が0, 標準偏差が1に変換)することによって、群落表面温度の年による高低を消去した。この解析で用いた群落表面温度-気温を計算することによっても年による群落表面温度の高低を消去できる可能性がある。

第4節 まとめ

植生指数は衛星データを用いる場合に地上の植生の情報を示す有用なパラメータである。したがって、この群落表面温度と植生指数を組み合わせることによって、より多くの地上の情報を得ることができると思われる。そのため植生指数と群落表面温度の関係について解析した。

植生指数については、次のことが明らかになった。①植生指数の日変化については朝夕にピークがある日変化を示し、しかも被覆率

が小さい時に朝夕のピークは大きい。②植生指数と被覆率，葉面積指数の間に高い相関関係があるが，直線回帰で表すには変動が大きい。これは植生指数は植物の活性や物理的な状態を表す係数であるが，被覆率や葉面積指数は植物の物理的な状態のみを表すためと思われる。③畑や森林では植生指数や被覆率が増加している生長期には両者は同じような変化を示しているが，生育後期には異なった変化を示している。これは生育後期には作物や樹木の光合成などの活性が落ちるため植生指数が低下するのに対して，被覆率は変化しないためと思われる。

また群落表面温度と植生指数の関係については，④植生指数を群落表面温度と気象要素の関係に入れると，寄与率や推定値の標準誤差が良くなり，より正確に群落表面温度を説明できる。⑤群落表面温度－気温と植生指数の間の回帰係数は，作物の種類によって異なり，地上における種々なパラメータに使用できることが予想できた。

群落表面温度と植生指数の関係は今後さらに発展すると思われる。

第Ⅷ章 あとがき

第 VIII 章 あ と が き

地球の陸地上の60～70%は植生がある表面である。この植生の表面と地球大気との物質交換によって地球の環境は成立している。したがって、地球環境からは植生表面の状態は重要な働きをする。地球の熱環境や熱に関係する環境は、その植生表面温度に影響を受けている。しかし、植生上の表面温度を測定することは困難であったため、ほとんど研究されていなかった。

1957年衛星が打ち上げられて、地球の状態が測定され、地球の表面温度も測定されるようになると、植生の働きの解明が進んできた。しかし、植生表面温度の基礎的研究がほとんど行われていないため、衛星データ解析の支障になっている。

この研究は衛星の進歩と共に発達してきた携帯型の放射温度計を使用して、植生の表面温度、すなわち群落表面温度について行った基礎的研究である。研究はまず放射温度計の特性から行った。

常温を測定する放射温度計は1960年代にアメリカで開発された製品である。しかし、価格が高いため、一般に使用されることは少なかった。わが国で放射温度計が普及したのは、わが国で製造されるようになった1980年代以降である。普及歴史が浅いため国産の放射温度計の特性や補正法はほとんど研究されていない。そのため誤って使用されることが多く、これを用いた結果も誤差が導入されたものが多い。

この研究は群落表面温度の測定に必要な放射温度計について、その特徴や補正法を研究し、さらに測定時に必要な群落の放射率の測定から研究を始めた。

さらに、群落表面温度の特徴を気温と対比しながら解析し、さらに作物群落の構造と群落表面温度の関係、群落表面温度に影響する気象要素などを解析した。さらに進んで群落表面温度と植生指数の関係を解析し、より群落表面温度を利用するための研究を行った。

本研究で明らかになった多くの事実があるが、主な事項は次のように要約される。

- ① 放射温度計は本体温度を20～30℃に一定にして測定すると精度良く測定できる。
- ② 屋外で放射温度計で測定する場合、天空長波放射の補正をしなければならない。
- ③ 単葉の放射率が大きい作物畑の群落放射率は大きい値を示す。
- ④ 植物の葉の着性状態によって群落表面温度は異なる。たとえば、生育初期には垂直分布型のウモロコシ畑は、水平分布型のダイズ畑より最高群落表面温度は高温であるが、生育後期には低温になる。
- ⑤ ダイズの葉の表面温度はトウモロコシの葉の表面温度に比較して、時間的、方向的に大きく変動している。
- ⑥ 昼間の群落表面温度は、気温、純放射、飽差などの気象要素の影響を受けるが、夜間は気温のみの影響が大きい。
- ⑦ 植生が少ないうちは群落表面温度は純放射の影響が大きい。植生が多くなると群落表面温度は気温の影響が大きくなる。
- ⑧ 群落表面温度と気温の差と植生指数の回帰係数は作物の種類によって異なる。

群落表面温度の研究は先にも記したようにまだ緒に着いたばかりである。今後多くの研究が行われ、群落表面温度の利用が進展することが望まれる。

謝 辞

1988年12月農業物理学教室に入ってから5年間たちました。この5年間は、私の人生の一つの転折点でした。大学まで中国で勉強したので、日本の大学生と比べて全く田舎の子です。例えば、パソコンの電源の場所も分りませんでした。この5年間の指導教官堀口教授には、研究の方向から実験の実施まで、日本の学生より2倍以上の力で指導していただきました。博士論文を完成した現在、感謝の気持ちでいっぱいですが、日本語で表現する適当な言葉がわかりません。

梅田教授と伊藤教授には本論文の校閲をしていただいて、懇切な御指導をいただき、お礼を申し上げます。

山口大学谷助教授および農業物理学教室の町村助手には、本研究の観測や解析には色々な御指導をいただきました。また、農業物理学教室の青木助教授、農業工学科及び農学部の方には、本研究を進めるにあたり議論に加えていただいたり、激励をいただきました。さらに、本研究の観測には苫小牧地方演習林の田中夕美子さんに並々ならぬお世話を受けました。また、農業物理学教室の多くの学生、院生たちに協力を受けました。事務官田中さんに、色々お世話になりました。これらの人々に深く感謝いたします。

特に奨学金を援助くれた日本国際教育協会、国際交流ホスピタリティ・トラストおよびロータリー米山記念奨学会に感謝いたします。この奨学金をもらったおかげで、経済的心配も少なく、研究が支障なく進みました。

末尾ながら、日本政府、日本国民に深く感謝いたします。

最後に、中日子々孫々の友好をお祈りいたします。

参 考 文 献

参 考 文 献

第 II 章 参 考 文 献

- 1) Conaway, J. and van Bavel, C.H.M., 1967a: Evaporation from Wet Soil Surface Calculated from Radiometrically Determined Surface Temperature, J. Appl. Meteor. 6, 650-655.
- 2) Conaway, J. and van Bavel, C.H.M., 1967b: Radiometric Surface Temperature Measurements and Fluctuations in Sky Radiant Emittance in the 600 to 1300 cm^{-1} Waveband, Agron. J., 59, 389-390.
- 3) Fuchs, M. and Tanner, C.B., 1966: Infrared Thermometry of Vegetation, Agron. J., 58, 597-601.
- 4) Hatfield, J.L., 1979: Canopy Temperature The Usefulness and Reliability of Remote Measurements, Agron. J., 71, 889-891.
- 5) Idso, S.B., and Jackson, R.D., 1968a: A Note on the Role of Sky Radiance in Infrared Thermometry, J. Appl. Meteor, 7, 521-522.
- 6) Idso, S.B., and Jackson, R.D., 1968b: Significance of Fluctuations in Sky Radiant Emittance for Infrared Thermometry, Agron. J., 60, 388-392.
- 7) Idso, S.B., Jackson, R.D., Ehrler, W.L. and Mitchell, S.T., 1969: A method for determination of Infrared Emittance of Leaves. Ecology, 50, 899-902.
- 8) 井村健二, 1986: 放射温度計シリーズ, Minolta Techno Report, 3, 12-22.
- 9) Jackson, R.D., and Idso, S.B., 1969: Ambient Temperature Effects in Infrared Thermometry, Agron. J., 61, 324-325.
- 10) 久保井常雄, 伊勢敏, 貝和良一, 猪股陽二, 榎本裕, 1977: 赤外線放射温度計 ER-2007, National Technical Report, 23,

905-910.

- 11) Lorenz, D., 1966: The Effect of Longwave Reflectivity of Natural Surfaces on Surface Temperature Measurements Using Radiometers, J. App. Met., 5, 421-430.
- 12) オプテックス株式会社:非接触温度計, 技術資料.
- 13) Sevendsen, H., Jensen, H. E., Jensen, S. E., and Mogonsen, V. O., 1990: The Effect of Clear Sky Radiation on Crop Surface Temperature Determined by Thermal Thermometry, Agri., Forst. Meteor., 50, 239-243.

第 III 章 参考文献

- 1) Buettner K. J. K., and C. D. Kern, 1965: The Determination of Infrared Emissivities of Terrestrial Surfaces, J. Geo. Res. 70-6, 1329-1337.
- 2) Caselles V., J. A. Sobrino and F. Becker, 1988: Determination of the Effective Emissivity and Temperature under Vertical Observation of A Citrus Orchard. Application to Frost Nowcasting, Int. J. Remote. Sens., 9-4, 715-727.
- 3) Caselles V., J. A. Sobrino and C. Coll, 1992: Physical Model for Interpreting the land surface temperature obtained by remote sensors over incomplete canopies. Remote Sens. Environ., 39, 203-211.
- 4) Fuchs M. and C. B. Tanner, 1966: Infrared Thermometry of Vegetation, Agron. J., 58, 597-601.
- 5) Fuchs M. and C. B. Tanner, 1968: Surface Temperature Measurements of Bare Soils, J. Appl. Meteor., 7, 303-305.
- 6) Idso S. B., R. D. Jackson, W. L. Ehrler and S. T. Mitchell, 1969: A Method for Determination of Infrared Emittance of Leaves, Ecology, 50-5, 899-902.
- 7) Idso S. B., R. D. Jackson, and R. J. Reginato, 1976: Determination of Surface Temperature from Infrared Radiation Measurements, J. Appl. Meteor., 15, 105-113.

- ning Emittances for Use in Infrared Thermometry: A Simple Techique for Expanding the Utility of Existing Methods, J. Appl. Meteor., 15, 16-20.
- 8) Idso S.B., R.D.Jackson, 1969: Comparison of Two Methods for Determining Infrared Emittances of Bare Soils, J. Appl. Meteor., 8, 168-169.
- 9) 計測自動制御学会, 1982: 温度計測, 温度計測部会編 一下間照男ら著.
- 10) 谷 宏, 木村彰人, 堀口郁夫, 1987: 放射温度計による地表面の放射率の推定について, 北海道農業気象, 39, 38-41.
- 11) 王 秀峰, 堀口郁夫, 町村 尚, 1993: 国産放射温度計の特性と天空長波放射の補正法, 農業気象, 49-3, 149-158.
- 12) Sobrino J.A., and V.Caselles, 1990: Thermal Infrared Radiance Model for Interpreting the Directional Radiometric Temperature of A Vegetative Surface, Remote Sens. Environ, 33, 193-199.
- 13) Sobrino J.A., and V.Caselles, 1993: A Field Method for Measuring the Thermal Infrared Emissivity, J. Photogrm. Remote Sens., 48-3, 24-31.

第 IV 章 参考文献

- 1) Blad, B.L. and N.J. Rosenberg, 1976: Measurement of crop temperature by leaf thermocouple, infrared thermometry and remotely sensed thermal imagery, Agron. Journ., 68, 635-641.
- 2) Heilman, J.L., W.E. Heilman, and D.G. Moore, 1981: Remote sensing of canopy temperature at incomplete cover, Agron. Journ., 73, 403-406.
- 3) Linacre, E.T., 1963: A note on a feature of leaf and air temperature, Agr. Meteorol. 1, 66-72.

- 4) 王 秀峰, 堀口郁夫, 町村 尚, 1993: 国産放射温度計の特性と天空長波放射の補正法, 農業気象, 49-3, 149-158.
- 5) 奥山富子, 1975: 赤外線放射温度計による梓試験水稲田の表面温度測定例, 農業気象, 30, 191-194.
- 6) Pennington, D. A. and L. Heaterly, 1989: Effects of changing solar radiation on canopy air temperatures of cotton and soybean, Agr., Fores., Meteorol. 46, 1-14.
- 7) 武智 修, 1968: 植物の葉温と熱収支, 農業気象, 24, 43-50.
- 8) 武智 修, 1969: 葉温に関する研究, 農業気象, 25, 41-43.
- 9) Tanner, C. B., 1963: Plant temprature, Agron. Journ., 55, 210-211.

第 V 章 参考文献

- 1) Blad, B. L., 1972: Orientation and distribution of leaves within soybean canopies, Agron J., 64, 26-29.
- 2) 中世古 公男, 1984: 豆類における葉の調位運動と光エネルギー利用効率との関係, 昭和58年文部省科学研究費補助金研究報告書.
- 3) 中世古 公男, 1984: 豆類の乾物生産特性に関する研究, 北大農邦文紀要14-2, 103-158
- 4) 武智 修, 1973: みかん園の微気象と葉の熱収支に関する研究, 愛媛大農紀要, 17, 1-134 .

第 VI 章 参考文献

- 1) 伊藤代次郎, 長谷場徹也, 1984: 種々の耕地のアルベドと放射収支, 農業気象, 40-1, 29-35.
- 2) 中川行夫, 1960: 水田の輻射収支及び漏水田の水温, 農業気象, 15-4, 143-146.
- 3) 武智修, 1972: みかん園の微細気象と葉の熱収支に関する研究, 愛媛大学農学部紀要, 17, 3-134.

第 VII 章 参考文献

- 1) Hope A.S., D.E. Petzold, S.N. Goward and R.M. Ragan, 1988: Simulated relationships between spectral reflectance, thermal emissions and evapotranspiration of a soybean canopy, *Water Res. Bull.*, 22-6, 1011-1019.
- 2) Hope A.S. and T.P. Mcdowell, 1992: The relationship between surface temperature and a spectral vegetation index of a tallgrass prairie: effects of burning and other landscap controls., *Int. J. Rem. Sens.*, 13-15, 2849-2863.
- 3) 堀口郁夫, 劉 大力, 町村 尚, 1993: NOAA/AVHRRデータによる森林火災地の植生指数と地表面温度による回復状況の解析, *日本リモートセンシング学会誌*, 投稿中
- 4) 王 秀峰, 堀口郁夫, 青木正敏, 谷 宏, 町村 尚, 1991: 衛星データによるサロベツ原野の地表面温度の解析, *北大農学部邦文紀要*, 17-4, 505-516.
- 5) Ramakrishna R.N., and S.W. Running, 1989a: Estimation of Resistance to Evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR Data. *J. App. Meteor.*, 28, 276-284.
- 6) Ramakrishna R.N., and S.W. Running, 1989b: Testing a theoretical climate soil-leaf hydrogic equilibrium of forest using satelllite data and ecosystem simulation, *Agric. Fores. Meteor.*, 44, 245-260.
- 7) Tucker C.J., J.H. Elgin, J.E. McMurtry, 1979: Temoral spectral measurements of corn and soybean crops, *Photogram. Eng. Remo. Sens.*, 45-5, 643-653.