敷藁の熱収支効果*

村 上 律 雄**
(気象庁産業気象課)

Effect of Straw Mulch on Heat Balance

Ritsuo Murakami

(Japan Meteorological Agency)

1. ま え が き

敷藁マルチの地温や土壌水分などに及ぼす効果については、多くの調査事例(安尾 1952 など)があるが、それらの知識をより一般化するためには、敷藁の働きの仕組みを知る必要がある。

ここでは、熱効果について考えると、敷藁は太陽光線をさえぎり、その一部を吸収し一部を反射する。一方、水蒸気の拡散も防ぎ地面蒸発を抑える。前者は地温の上昇に抑制的に働くが、後者は地温上昇を助ける。したがって、敷藁の地温効果の説明としては、従来いわれているようなアルベド(McCalla 1947)や純放射量(中川・坪井 1962)の違いだけでは十分でない。筆者は柏における観測資料を用い、敷藁地と裸地の間で熱収支の状態を比較し、敷藁地に特徴的な熱収支項について、敷藁条件による違いを調べた。

2. 熱収支項の測定および推定方法

裸地面における熱収支は次式で表わされる。

$$R_s + R_l + B + LE + A = 0 \quad (1)$$

ただし、 R_s は正味の短波放射で、太陽光線の直達と散乱による放射、それに地表面のアルベドに関係する。 R_l は正味の長波放射で、地表面から失われる長波放射と大気からはいる長波放射の差に相当する。 B は土壌中の熱フラックス、 LE は地表面からの蒸発による潜熱フラックス、 A は地表面と空気との間の伝導や拡散による顕熱フラックスである。これらの符号は地表面に向う放射フラックスを正にとる。

また、敷藁の表面における熱収支も同様に次式で表わされる。

$$R_s + R_l + B + B' + LE + A = 0 \quad (2)$$

ただし、 B' は藁の温度変化に使われる熱フラックスである。

1965 年 8 月 24~25 日に、気象大学校(千葉県柏市)構内にある気象庁観測部産業気象課の観測露場に設けた敷藁地および裸地で第 1 表に示すような微気象観測を行い両者の熱収支状態を比較した。

Table 1. Items, points and methods of observation.

Observed item	Observed point	Method used for the observation
Soil moisture	Surface (0-1 cm,) 1.5, 2.5, 5, 10, 20, 25, 30cm depth	Sampling and oven drying method
Soil temperature	Surface 2.5, 5, 10, 20, 30cm depth	Thermocouple Bent stem earth thermometer
Air temperature	2, 10, 20cm height	Thermocouple
Humidity		Thermocouple
Straw temperature	Surface	Eppler pyrliometer
Solar radiation		Golzynskys' solarimeter
Albedo		
Wind speed	2.5cm height 10, 20cm height	Hot-wire anemometer Rikokens' small cup anemometer

* 昭和44年 2 月28日関東支部例会にて発表

** 現名古屋地方気象台

この場合、観測場所の土壌は深さ 20~25cm まで掘り起こし、約 1cm 目のふるいを通し、草根、石塊などの異物を取り除き、踏み固めたりしないように注意して平らにならした。そして降雨で土壌が十分落ち着いてから測器の設置および敷藁処理をした。敷藁は小麦稈を風乾重量で 3.3m² 当り 3kg の割合で 4m×4m の広さに敷いた。この厚さは地表面がほぼ見えなくなる程度である。

(1) 短波放射 R_s の測定

直達および天空放射はエプレー日射計で観測し、アルベドはゴルチンスキー日射計を用い、高さ 75cm から下向きにして観測した値を上向きのときの値で割つたものをアルベドとした。地表面における正味の短波放射 R_s は次式のようになる。

$$R_s = R_i(1-r) \quad (3)$$

ただし、 r は地表面のアルベド、 R_i は水平面短波放射である。 r の値は裸地では地表面の土壌水分によつて変わる(丸山 1962)。一方、敷藁面からのアルベドは、McCalla (1947) によると、藁量のごく少ないうちは背影としての土壌面の影響をうけるが、地表面をほぼ完全に覆う程度以上では藁量に関係なく、藁の種類や被覆期間によりほぼ一定の値となる。

8 月 24 日に熱収支観測圃場で測定したアルベドおよび地表面 (0~1cm) の土壌水分含水比は第 2 表に示すとおりである。湿つた土壌面の露出している裸地のアルベドは著しく小さく、敷藁地のアルベドはその 2 倍以上ある。

Table 2. albedo(r) and moisture content in the first centimeter of soil surface (p), August 24, 1965.

Time		7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Mean
Treatment													
Wheat straw mulch (3kg/3.3m ²)	r	17.0	16.3	16.4	16.1	16.1	16.3	15.3	15.9	16.1	15.9	16.4	16.2%
	p	73.8	73.6	73.4	72.2	70.6	71.8	72.2	71.7	71.2	72.1	71.9	72.2%
Bare soil	r	5.4	6.9	6.6	7.0	6.8	7.9	7.4	8.2	8.4	8.3	8.3	6.4%
	p	73.1	71.9	71.7	69.2	66.8	67.7	66.9	66.1	63.6	65.0	63.9	67.8%

(2) 正味の長波放射 R_l の推定

正味の長波放射 R_l は Brunt (1932) の次式で計算した。

$$R_l = (1-a-b\sqrt{e})\sigma T^4 \quad (4)$$

ただし、 $a=0.51$, $b=0.066$ とし、mb の水蒸気張力 e は同一露場内の百葉箱における温・湿度の記録から求めて用いた。また、 T には第 1 図に示した裸地面および藁の表面の温度を用いた。

(3) 土壌中の熱フラックス B の計算

土壌中の熱フラックス B は温度積算法で計算した。すなわち、与えられた期間中に土壌単位面積に貯えられる(または失われる)熱量は期間の始めと終りの土壌内における温度分布と深さの関数としての土壌の熱容量がわかつていれば次式で計算できる。

$$\Delta B = \int_0^\infty \rho s \Delta T dz = \int_0^\infty c_s \Delta T dz \quad (5)$$

ただし、 ρ および s は土壌の密度および比熱、 ΔT は期間中の土壌の温度変化、 z は深さである。積分の下限は土壌表面 ($z=0$) であり、上限は事実上期間中の温度変化が 0 になるような深さをとればよい。ここでは、地表面、深さ 2.5, 5, 10, 20 および 30cm の 6 層の観測値を用いた。当日の両区における地温日変化は深さ別に第

1 図に示した。

つぎに、土壌の熱容量 $c=\rho s$ の値は含水量によつてかなり大きく変化することを考慮して次式で近似させた。

$$c = \rho d(S_d + P) \quad (6)$$

ただし、 ρd は乾土の密度、 S_d は乾土の比熱、 P は土壌水分含水比である。

この方法は Carson ら (1963) によつて吟味されているが、筆者も丸山 (1957) の測定値を用いて若干検討した。丸山は柏の表土(黒ボク)を用いていろいろの含水率での湿土の比熱を示しているので、この含水率を含水比に換算し、これと比熱との関係を求めたところ、両者の間に第 2 図に示すような直線関係が認められた。

$$y = 0.0042x + 0.353 \quad (7)$$

ここで、 y は湿土の比熱、 x は含水比%の土壌水分である。この式から乾土の比熱を求めると $0.353 \text{ cal g}^{-1} (\text{deg C})^{-1}$ となる。有機質に富むこの黒ボクの乾土比熱は岩石類の比熱より大きい。つぎに、この乾土比熱と水の比熱 (≈ 1) を用いて、任意の含水比 P のときの湿土の比熱 S_p を次式で計算した。

$$S_p = mS_d + nS_w \quad (8)$$

ただし、 S_d および S_w は乾土および水の比熱、 m および n は湿土 1g 中の土壌と水の重量割合であり、含水比

Fig. 1. Diurnal variations in soil temperature(1), air temperature(2) and straw temperature at the bare plot the plot and mulched with wheat straw of and 3kg per 3.3m²

Pを決めると、次の連立方程式から求められる。

$$\begin{cases} m+n=1 \\ n/m=P \end{cases} \quad (9)$$

第2図の点線はこうにして求めた比熱の計算値を示す。丸山の実測値より低水分域でやや高く、高水分域で低くなっているが、図示した土壌水分の範囲内では、両者の違いは±5%以内にある。したがって、乾土の密度 ρ_a を適当に選べば、6式はほぼ妥当な近似を与えるといえる。ここでは ρ_a として、表層3cmについては現地測定の前平均値(裸地:0.55, 敷藁地:0.53)を用い、それ以下の深さについては裸地の土壌水分観測場における標準状態の値(3~10cm:0.52, 10~20cm:0.53, 20~30cm:0.56)を用いた。また、土壌水分は日変化の大きい表層0~3cmについては毎時の実測値を、そ

Fig. 2. Relation between soil moisture content and specific heat of soil. Solid line: Observed values by E. Maruyama. Dotted line: Computed values from Equation (8).

れ以下については観測の始めと終りの平均値を用いた。

(4) 敷藁の温度変化に使われる熱量 B' の推定、
3kg/3.3m²の敷藁は1cm²当り0.09gである。また藁の比熱は0.3 cal g⁻¹(deg C)⁻¹程度であるが、湿った面におかれているので、藁の重さの50%の水分を含んでいるとしその熱容量を0.072 cal cm⁻²(deg C)⁻¹にとつた。また、敷藁の温度としては、第1図に示した藁の表面温度と被覆層内の気温との平均値を用いた。

(5) 潜熱 LE および顕熱フラックス A の推定
蒸発による潜熱および伝導や乱れによる顕熱伝達量は日変化の解析では、 $LE+A$ を(1)式および(2)式の残差として求め、日量についてのみ両者の分離を試みた。この分離は土壌水分から求めた蒸発量を用いて行なつた。

第3図は8月24日6時および25日6時と期間中に地表面近くの土壌が最もかわいたときの土壌水分含水比の鉛直分布を示す。表面の土壌水分がその少し下層より常に高いのは、整地後の強い雨で洗い出された粘土質が表面に浮き上がったからである。この土壌水分測定値から24日6時と25日6時との含水量差を求めると、裸地で3.74mm、敷藁地で1.26mmと計算された。裸地の3.74mmは同じ期間の大型蒸発計蒸発量の53%、地下水位50cmの蒸発散位計からの蒸発散量の72%である。また、敷藁地の値は裸地の約1/3であり、筆者が先

に得た実験結果(第7表)から推しても湿つた裸地面との比較ではまず妥当な値といえる。そこで、これらの値を観測期間中の蒸発量とし、これらの値にそれぞれの平均地表面温度に対応する蒸発熱を乗じ潜熱伝達量 LE

とした。 $LE+A$ のうちの残りを顕熱伝達量とした。

3. 熱収支の推定結果および考察

以上の方法で 1965 年 8 月 24 日 6 時から 25 日 6 時にかけて、裸地と小麦稈 $3\text{kg}/3.3\text{m}^2$ の敷藁地における各熱収支項を 1 時間ごとに推定した結果は第 4 図に示すとおりである。さらに大まかな時間帯別の比較を第 3 表に要説した。この期間中の天候は 24 日の昼すぎに一時雲が広がったほかは快晴で、日中は $1\sim 2\text{m}$ の南東の風があり、夜は静穏であつた。

まず、項目別に比較すると、①反射短波放射量は当然のことながら、裸地よりアルベドの大きい敷藁地の方が多い。②有効長波放射量は裸地面と敷藁面との温度差の影響で敷藁地が裸地より日中大きく夜間小さくなつたが、両者の違いはわずかである。③その結果、地表面に受ける日中の純放射量はアルベドの小さい裸地が敷藁地より多い。夜間の純放射は上向きで裸地がわずかに多い。④地中熱フラックスは日中地中にはいる熱量、夜間出ていく熱量とも敷藁地の方が裸地より少ない。⑤敷藁の貯熱量は他の熱収支項にくらべると無視できるほど少ない。⑥空気への潜熱および顕熱伝達量 ($LE+A$) は日中は敷藁地より裸地がいくらか多い。夜間は熱を受けその量は表面の冷える敷藁地がわずかに多い。しかし、 $LE+A$ では裸地と敷藁地との間にあまり大きな違いはない。

つぎに、潜熱伝達量と顕熱伝達量を分離した結果は第 4 表に示すとおりである。

この表によると、第 3 表でほぼ同じ値を示した $LE+A$ のうち、個々のしめる割合は裸地と敷藁地とで著しく違う。裸地では純放射量の 85% 以上が潜熱として消費され顕熱伝達量はわずか 8% であるが、敷藁地では潜熱消費は純放射量の 34% のみで半分以上が顕熱として空気中に伝達されている。このため、ボーエン比 (A/LE) は裸地の 0.09 に対し敷藁地は 1.69 にもなっている。これは昼夜を平均した結果であるので、日射の強い日中には両者の違いはもつと強く現われよう。

以上の比較から敷藁の主な熱収支効果としては次の点があげられる。

敷藁はその大きなアルベドにより藁面の吸収する純放射量を少なくするが、さらにその純放射量の多くを土壌面に達する前に空気中へ顕熱伝達する。つまり、敷藁の大きな地温効果や蒸発抑制効果は敷藁層による熱や水蒸気の遮断効果であるが、熱収支からみると、とくに日中はアルベドよりも顕熱伝達で空気中に地温上昇や蒸発のための熱を失なうことによるといえるようである。

Fig. 3. Variation of soil moisture profile during 06 hr on 24 th to 06 hr on 25 th August 1965.

Fig. 4. Diurnal variation in heat balance at the bare plot and the plot mulched with wheat straw of $3\text{ kg per }3.3\text{m}^2$, 24~25 August 1965. Ri: Total short wave radiation, $r\cdot Ri$: Reflected short wave radiation, Rl: Effective long wave radiation, Rn: Net radiation, B: heat Storage in soil; B': heat storage in straw, LE: Latent heat flux, A: Sensible heat flux.

Table 3. Heat fluxes at the bare soil surface and at the surface of straw mulch, 24~25 August 1965. (cal/cm²)

Ri: Total short wave radiation. r·Ri: Reflected short wave radiation. RI: Effective long wave radiation. Rn: Net radiation. B: heat Storage in soil. B': heat Storage in straw. LE: Latent heat flux. A: Sensible heat flux.

Item	Time Treatment	6~12 h		12~18 h		18~6 h	
		Mulch	Bare	Mulch	Bare	Mulch	Bare
Ri		+246.49		+167.72		0.0	
r·Ri		-40.34	-16.81	-26.59	-13.04	0.0	0.0
RI		-37.19	-36.69	-36.00	-35.60	-59.82	-60.58
Rn		+168.96	+192.99	+105.13	+119.08	-59.83	-60.58
B		-46.18	-54.86	+4.33	+10.70	+24.16	+29.04
B'		-1.38	0	+1.20	0	+0.34	0
LE+A		-121.40	-138.13	-110.61	-129.78	+35.32	+31.64

Table 4. latent(LE) and sensible(A) heat fluxes in relation to net radiation(Rn), 6 h 24~6 h 25 August 1965. (cal/cm²)

Item Treatment	LE	A	Rn	A/LE	LE/Rn	A/Rn
Bare	-215.69	-20.60	+251.49	0.09	-0.86	-0.08
Mulch	-73.08	-123.66	+214.27	1.69	-0.34	-0.58

Table 5. Albedo in % from different amounts of straw mulch, applied on July 19, 1965.

Treatment Date			Unmulched Plot	Wheat straw mulch in kgs per 3.3m ²				
				0.5kg	1.0kg	1.5kg	2.0kg	4.0kg
August	13	12h	12.3	13.3	14.7	14.8	15.3	15.3
"	17	"	7.4	9.5	12.7	13.4	14.8	14.8

実際、敷藁地はいつたん藁の表面に吸収された熱が伝導により土壤に伝わるので、第1図に示したように藁温ばかりでなく藁面付近の気温も著しく高くなるが、敷藁層は隙間が大きく風通しがよいので、暖まった空気の入れ替わるのが容易であると思う。

4. 熱収支効果の敷藁量による違い

つぎに、上述のような敷藁の熱収支効果が藁量によつてどのように変わるか、主な熱収支項と敷藁量との関係を用いて考察した。

(1) 反射短波放射量

第5表は1965年7月19日に被覆処理したいろいろな厚さの小麦稈敷藁地で、晴天であつた8月13日と17日の12時に測定したアルベドを示す。裸地および少量敷藁区で両日のアルベドが大きく違うのは土壤水分の効

果で、同時に観測した表面の土壤水分は含水比で13日は16.0%、17日は41.6%あつた。また、2kg区、4kg区のアルベドが第2表の敷藁区のそれより小さいのは、敷藁期間が長いと藁がしだいに変色するからである。いずれにしても敷藁量の増加によるアルベドの増加ははじめ急速でだんだんゆるやかになり、地表面をほぼ完全に覆う2~3kg/3.3m²以上になるとほぼ一定値を示すようになる。したがつて、反射短波放射量もそれ以下でのみ変化すると考えてよいであろう。

(2) 地中熱フラックス

1962年6月20日9時から21日9時にかけての毎時の地温および土壤水分観測値を用いて2(3)と同じ方法で求めた地中熱フラックスを期間中に地中に入つた熱量および放出された熱量にまとめて第6表に示した。地中に入入りする熱量は敷藁量9kg/3.3m²までの範囲で

Table 6. Effect of amount of wheat straw on heat storage in soil, June 20~21, 1962 (cal/cm²)

Item \ Treatment	Unmulched plot	Wheat straw mulch in kgs per 3.3m ²		
		1kg	3kg	9kg
Stored	77.8	58.5	54.3	27.7
Lost	63.5	45.3	38.0	28.8

Table 7. Soil water deficiency in the surface 20cm of soil, averaged for 13~17 August, 1963.

kgs of wheat straw per 3.3m ²	0	1	3	6	9	18
Soil water deficiency in mm	21.1	20.0	11.9	9.1	6.7	6.9

Table 8. Variation of heat balance items due to different amounts of straw application under the same meteorological condition as Table 3. (cal/cm²)

Ri: Total short wave radiation. r·Ri: Reflected short wave radiation. RI: Effective long wave radiation. Rn: Net radiation. B: heat Storage in soil. B': heat Storage in straw. LE: Latent heat flux. A: Sensible heat flux.

Item \ Treatment	Wheat straw mulch in kgs per 3.3m ²		
	1kg	3kg	9kg
Ri	+414.21	+414.21	+414.21
r·Ri	-57.58	-66.93	-66.93
RI	-132.94	-132.94	-132.94
Rn	+223.69	+214.34	+214.34
B	-14.33	-17.69	+0.59
B'	0	0	0
LE	-122.77	-73.08	-30.07
A	-86.59	-123.57	-184.86

は明らかに敷藁が厚いほど少なくなっている。

(3) 潜熱伝達量

第7表はいろいろな厚さの敷藁地で夏の干ばつ時に測定した表土 20cm 中の土壌水分不足 (圃場容水量と差) を示したものである (村上 1964)。土層が浅いので、とくに乾燥のはげしい裸地では下層からの水分補給がかなりあり、表の土壌水分不足を直接蒸発量とみなすことはできないが、藁量の増加で蒸発量の減少する傾向の目安にはなる。この表によると、9kg/3.3m²まで敷藁量の増加につれて蒸発量が減少するとみられるので、それにとりあつて潜熱伝達量も減少することになる。

(4) 顕熱伝達量

実測値がないので、熱収支の残差として推定した。すなわち、第3表の条件のときに、敷藁 3kg/3.3m²を基準に第5~7表の割合で各熱収支項の藁量による変化があるものとして計算した熱収支表を第8表に示す。ただし有効長波放射は一日を平均すると、藁量による違いはあまりなかつたので一定とし、また、藁の貯熱量はごく小さいので無視した。

この表によると、敷藁が厚くなるにつれて、潜熱消費量が減少し、顕熱伝達量が多くなる。とくに日中だけ考えれば、地中熱フラックスも藁量が多いほど少なくなるので、この減少分も顕熱伝達量になり、藁量による熱収支の違いはさらに顕著になる。いずれにしても、敷藁の熱収支効果は、アルベドよりも顕熱伝達で純放射量の多くを大気中に放出することにあるといえる。

5. ま と め

柏の黒ボク土壌における裸地と敷藁地の間で比較観測した微気象観測資料を用い、敷藁の熱収支に及ぼす効果を評価した。得られた主な結果は次のようである。

(1) 敷藁の温度変化に使われる熱量は他の熱収支項にくらべると、無視できるほど小さかつた。

(2) 敷藁地は裸地より反射短波放射量および顕熱伝達量が多く、地中貯熱量および潜熱伝達量が少なかつた。

(3) これらの傾向は、アルベドが藁量 2~3 kg/3.3 m² 前後で限界になつたのを除くと、敷藁が厚いほど顕著に現われた。

(4) 敷藁による日中の地温上昇や蒸発の抑制効果は、アルベドよりも顕熱伝達の効果によるものであることが明らかにされた。

引 用 文 献

- 1) Brunt, D. (1932): Notes on radiation in the atmosphere, 1. Quart. J. Roy. met. Soc., 58, 389-420.
- 2) Carson, J. E., and H. Moses (1963): The annual and diurnal heat-exchange cycles in upper layers of soil. J. Applied Met., 2,

- 397-406.
- 3) McCalla, T. M. (1947): Light reflection from stubble mulch. *Agronomy J.*, **39**, 690-696.
- 4) 丸山栄三 (1962): 土じょう面蒸発に関する研究. *研究時報*, **14**, 1-32.
- 5) 村上律雄 (1964): 敷藁の土壌水分保持効果(1) 敷藁量と効果との関係. *農業気象* **20**, 61-64.
- 6) 中川行夫・坪井八十二(1962): 果樹園の土壌管理の違いによる地温変化について. *園芸学会誌*, **31**, 13-16.
- 7) 安尾正元(1952): 有機物による被覆効果. *農業及園芸*, **27**, 1307-1309, 1419-1422.

Summary

Effects of straw mulch on heat balance items are studied by comparing micrometeorological data of an unmulched plot to those of a mulched plot of 3kg per 3.3m². The heat storage in the straw was negligible and the mulching caused a higher value of albedo and a greater upward flux of sensible heat than the unmulched plot. Thus the mulching reduced the soil heat and the latent heat fluxes. The albedo of mulch reached the maximum at an amount of 2kg to 3kg per 3.3m². But the soil heat and the latent heat fluxes decreased with increasing amount of straw applied. In conclusion, the main effect of straw mulch is to increase considerably the sensible heat flux at the expense of other items of heat balance.

支 部 だ よ り

1. 昭和44年度九州支部大会

長崎県総合農林センター, 44.7.31~8.1

研究発表

1. 九州の降水時の解析例
九大・農 塩月, 早川, 清野
2. 九州の雪
塩月, 早川, 清野
3. 九州瀬戸内地域上空の水蒸気収支(2)―湿潤期―
塩月, 早川, 清野
4. 九州瀬戸内地域上空の水蒸気収支(3)―乾燥期―
塩月, 早川, 清野
5. 九州における強雨の統計的性質からみた降雨機構
福航測 山田
6. 西日本豪雨災害(統報)
九大・農 坂上
7. 日降水量の頻度
林試 岡本
8. 牧草の天日乾燥に関する研究(2)
九農試 鈴木, 谷口
9. 日射量の数値計算(1)斜面日射
九大・農 塩月, 早川, 清野
10. 日射量の数値計算(2)平面日射
九大・農 塩月, 早川, 清野
11. 長崎における日射量の特長
12. 植被の放射収支に関する研究(Ⅱ)
水稲群落の放射スペクトル収支 九農試 岸田
13. 球形積算日射計のための日射換算図表
九農試 岸田
14. 稲の干害と総観気象過程
福管気 尾崎
15. 海塩核粒子の測定(Ⅱ)
九大・農 杉谷
16. 山岳草地の局地気候に関する研究(第2報)
九農試 松田, 鈴木
17. 山岳草地の局地気候に関する研究(第3報)
九農試 松田, 鈴木
18. 大型ビニールハウスの強制換気方式の換気効果
宮崎農試 佐野, 富山, 神近, 竹前, 岩永
19. ウキマルチによる筑後の初夏の水田温度上昇
九農試 佐藤

特別講演

1. 気候統計の農業への利用 福管気 日下部正雄
2. 長崎の気候の特性 長海洋気 安井 豊
3. 葉面蒸散に関する問題 九大農 武田京一
4. ヨーロッパ旅行 佐大農 横尾多美男
(次頁へつづく)