



放射熱伝達の解析(第5報) :
燻煙による農地の保温効果について

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-07-29 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 媚山, 政良 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/3725

放射熱伝達の解析

(第5報, 燻煙による農地の保温効果について)

媚山 政良

Analysis of Radiative Heat Transfer

(5th Report, Effect of Keeping Warmth for Field by Smoke Screen Method)

Masayoshi Kobiyama

Abstract

The effect of keeping warmth for field by the smoke screen method is investigated by the theoretical analysis in this paper. It is cleared that the smoke screen method has the remarkable effect of keep the field warm if any conditions were met and that there is the most suitable range of the smoke particle density so as to use the smoke effectively. In order to make the effect of the smoke screen method sure, it is necessary to improve the radiative properties of the smoke particle, to control the flow of the smoke and to develop the smoke generator which can generate a large quantity of smoke and has high efficiency.

1. まえがき

霜害は春または秋の晴れた静かな夜, 温度が異常に低下することによりおこる作物の被害である。このような気象状態は主として, 大陸の高気圧から分離した移動性高気圧がわが国を通過してゆくとき起き, とくに気団の温度が低く, 夜間の放射冷却の度合が大きくなるような場合に霜害をもたらす。霜害には地域性があり, また著るしい局地性もある。一方, 農作物からみると各作物に対し, 発芽期, 開花期および結実期における霜害危険温度¹⁾が存在し, この温度よりも低温になると作物は凍死のおそれがある。

霜害の気象的防除法としては恒久対策と応急対策とがある。前者では, 農業経営的対策, 局地気候の改良があげられ, 後者では燃焼法, 被覆法, 煙霧法, 散水永結法, 通風法, 灌水法¹⁾などが代表的なものであり, 条件に応じてそれぞれ実用に供されている。

煙霧法は枯草やモミガラ, 古タイヤあるいは発煙剤などを燃やし, 大量の煙を発生させ, これによって夜間の農地および接地気層の放射冷却を防ぎ, あわせて作物体の温度降下を防止する方法であり, わが国では燻煙とよばれ, かなり古くから桑園などの霜害防除用に用いられてきた。この方法は比較的安価であり, 一度に広い領域を霜害から守りうるという利点を持って

いる。

燻煙による防霜（保温）効果は次の要素から成っている²⁾。

(i) 煙粒子の放射熱遮蔽効果による放射放熱量の減少

(ii) 煙の発生時に放出された熱による加熱

(iii) 煙の親水性粒子への水蒸気の凝結により発生した熱による加熱

上記のうち本報では(i)について検討を行なうが、これは有煙（放射性）流体による伝熱面の保温（熱遮蔽）効果とみなすことができる。

燻煙による防霜効果については、すでに小沢²⁾により検討が行なわれてきており、燻煙を施す上で重要ないくつかの事項についての指摘がなされている。しかし、燻煙量、風速などの違いによる煙の広がり方や濃度の変化、またその煙粒子による農地の保温効果の定量など、実際の燻煙作業を行なう上で必要な諸量の検討まではいまだなされてはいない。したがって、本報では燻煙による農地の保温効果を理論的な解析を通し明らかとし、燻煙作業に必要な諸量を定め、つぎに燻煙を有効に利用し農地に対する保温効果を高める方策について検討を行なう。

記号

A: 大気の大気拡散による熱流束 kcal/m ² sec	m: 煙発生源の数 本
a: 放射減衰係数 (質量吸収係数) m ² /g	n: 大気不安定度パラメータ
a _R , b _R : 係数 式(17)	Q ₀ : 燻煙量 m ² /sec
B: 土壌の熱物性値 式(31)	ΔQ ₀ : 単位煙発生源当りの燻煙量 (m ² /sec)/本
C: 煙粒子の濃度 m ² /m ³ 式(18)	R ₀ , R ₀ *: 放射能 kcal/m ² sec 式(27), (29)
C*: 煙粒子の鉛直方向の積算濃度 m ² /m ² 式(12)	R ₁ , R ₂ , R ₃ , R ₄ : 放射熱量 kcal/m ² sec 式(17), (18), (20), (21)
C* _{ref} : 基準条件下での煙粒子の 積算濃度 m ² /m ² 式(58)	T: 非燻煙時の地表面温度 °K, °C
C', C'': 係数 式(5), (6)	T*: 燻煙時の地表面温度 °K, °C
C ₁ , C ₁ *, C ₂ *: 係数 式(31), (33), (34)	T ₀ : 日没時の地表面および地中温度 °K, °C
c ₁ : 土壌の比熱 kcal/kg°C	t: 時間 sec, hour
C _y , C _z : Suttonの拡散係数 式(10)	u: 速度 m/sec
D: 水蒸気の凝縮熱流束 kcal/m ² sec	u ₀ : 基準高度 z ₀ における速度 m/ sec
En: 指数積分関数 式(19)	x, y, z: 座標 m 図1
e: 空気中の水蒸気の分圧 mb	y ₀ : y方向の代表距離 m
F(x, y), F(x, z): 正規分布 式(1), (2)	z ₀ : 基準高度 m
f ₁ , f ₁ *, f ₂ *: 係数 式(50), (54)	γ ₁ : 土壌の比重量 kg/m ³
K ₁ : 土壌の温度伝導度 m ² /sec	γ _s : 煙粒子の比重量 g/m ³
L: 非燻煙時の放射熱流束 kcal/m ² sec 式(26)	ΔT: 非燻煙時の温度降下量 °K, °C 式(49)
L*: 燻煙時の放射熱流束 kcal/m ² sec 式(28)	ΔT*: 燻煙時の温度降下量 °K, °C 式(52)
l: 着目点間の距離 m	

ΔT_{Ref} : 基準条件下での ΔT °K, °C
式(65)

δT_0 : ΔT_{Ref} の T_0 による補正係数
式(63)

ϕ_B : ΔT_{Ref} のBによる補正係数
式(64)

δ_w : 煙粒子層の透過率 式(21)

ϵ_r : 夜間大気放射率 式(17)

ϵ_R : 煙粒子層の放射率 式(18)

ϵ_s : 煙粒子層の放射率 式(19)

Π : 相似変数 式(39)

σ : Stefan-Boltzmann
定数 $=1.356 \times 10^{-11} \text{kcal/m}^2 \text{°K}^4 \text{sec}$

σ_n : C^*_{Ref} のnによる補正係数 式(59)

$\sigma_{n,Ref}$: 基準条件下での σ_n 式(60)

σ_y, σ_z : 標準偏差 式(19)

τ : 光学距離

τ_0 : 煙粒子層の鉛直方向の光学距離

Φ : 農地の保温効率 式(55)

Φ_{τ_0} : τ_0 による Φ の値 式(67)

Φ_{Ref} : 基準条件下における Φ 式(71)

ϕ_t : Φ_{Ref} のtによる補正係数 式(68)

ϕ_{T_0} : Φ_{Ref} の T_0 による補正係数 式(69)

ϕ_B : Φ_{Ref} のBによる補正係数 式(70)

ϕ : 地表面の法線と着目点の方向のなす角 rad

添字

* : 燻煙時 Ref : 基準値 1 : 土壌

I : 計算値 II : 図による値

2. 基礎方程式

2.1 座標系と解析条件

座標系を図1に示す。燻煙は $x=y=z=0$ において行なう。なお、煙粒子の拡散はおもに大気状態により定まり、農地内部の温度の変化は農地の物性および利用状態により定まるので、おのおの独立した現象として取扱い、両者は煙粒子および大気から地表面への放射熱伝達により結びつくものとして解析を行なう。

(i) 煙粒子の拡散に関する解析条件

- ① 農地は平坦地であり、風速は一定とする。
煙粒子は地上に置かれた点源から連続的に一定量大気中へ供給されるものとする。煙粒子の浮力、重力による移動はなく、また煙粒子の地表面での吸着および空中水分の吸着もここでは考えないものとする。したがって、煙粒子濃度分布の時間的な変化はない。
- ② 大気は主流方向(x)にのみ速度 $u(z)$ をもつ。また、この方向では濃度差による煙粒子の拡散はないものとし、流れによってのみ運

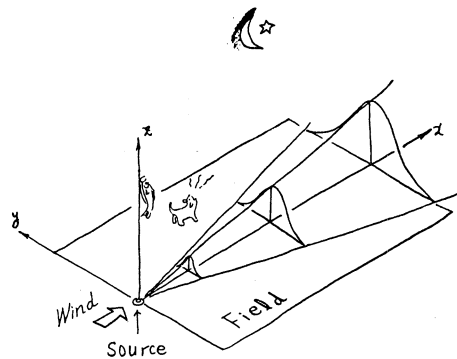


図1 座標系

搬されるものとする。主流に直角方向 (y, z) の濃度分布は拡散方程式の解である正規分布に従うものとする。ただし、拡散の速度は標準偏差を用い表現し、またその値は主流方向の距離および大気状態の関数とする。

- ③ 煙粒子の温度は、煙煙を施さない地面の温度と同一の値をとり過渡変化を行なうものとする。したがって、煙の発生時に放出される熱による農地の加熱効果はここでは考えず、単に煙粒子による放射熱遮蔽効果のみを解析の対象とする。

(ii) 農地内部での熱伝達に関する条件

- ① 熱伝導は鉛直方向 (z) のみを考え、物性値は一定とする。
 ② 日没時での地中温度は地表面温度と同一とし、また近似的に地表面での熱流束の変化は少ないものとする。ただし、導かれた地表面温度を示す式においては、熱流束は周囲の状態により変化するものとする。

(iii) 大気および煙粒子と地表面との熱伝達に関する解析条件

- ① 大気および煙粒子と地表面との熱交換は放射熱伝達によってのみ行なわれるとする。
 ② 大気および煙粒子はある時間にある温度で地表面と熱平衡状態にあるものとする。また、放射熱流束の水平方向 (x, y) での変化は少ないものとする。
 ③ 地表面は熱放射に対し黒体であり、地表面の面積は鉛直方向からみた値とする。煙粒子は灰色放射性流体とし、煙粒子層を通る放射線は煙粒子の鉛直方向の積算した濃度に比例し減衰するものとする。なお、放射物性値は近似的に日没時の条件によるものとする。

2. 2 基礎方程式

(i) 煙粒子の濃度分布 $C(x, y, z)$ および鉛直方向積算濃度 $C^*(x, y)$

煙粒子濃度の空間分布は、ばい煙の拡散推定に広く用いられているブルーム式^{3),4)}を煙煙の場合に適用し求める。主流に直角方向の煙粒子の濃度の分布の割合 $F(x, y)$ 、 $F(x, z)$ は $\sigma_y(x)$ 、 $\sigma_z(x)$ をおのおの y, z 方向の標準偏差とすると次の正規分布 (ガウス分布) 関数により示される。

$$F(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y(x)} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right) \quad (1)$$

$$F(x, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_z(x)} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) \quad (2)$$

任意の空間 (x, y, z) における煙粒子の濃度 $C(x, y, z)$ は次式として表わせる。

$$C(x, y, z) = CF(x, y)F(x, z) \quad (3)$$

ここで、 C' は煙粒子の保存則から求められる。すなわち、煙煙量を Q_0 、風速を $u(z)$ とすると次式を得る。

$$Q_0 = \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} C' u(z) F(x, y) F(x, z) dy dz \quad (4)$$

したがって、 C' は次式として表わされる。

$$C' = (Q_0/u_0) / \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{u(z)}{u_0} \right) F(x, y) F(x, z) dy dz \quad (5)$$

また、 C'' を次式とし、式(5)を書き直すと式(7)を得る。

$$C'' = \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{u(z)}{u_0} \right) F(x, y) F(x, z) dy dz \quad (6)$$

$$C' = (Q_0/u_0) / C'' \quad (7)$$

なお、速度 $u(z)$ を一定値 U とおくと $\int_{-\infty}^{+\infty} F(x, y) dy = 1$, $\int_0^{+\infty} F(x, z) dz = 1/2$

より $C'' = 1/2$ となり、 $C' = 2 Q_0/U$ を得る。これを式(4)に代入するとSuttonの式となる。以上の諸式により煙粒子の濃度分布は次式となる。

$$C(x, y, z) = \frac{Q_0}{u_0 C''} \frac{1}{2\pi \sigma_y(x) \sigma_z(x)} e^{-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)} + \frac{z^2}{2\sigma_z^2(x)} \right)} \quad (8)$$

ここで、 $\sigma_y(x)$ 、 $\sigma_z(x)$ は主流に直角方向の煙粒子の拡散を規定する値であり、乱流場を考慮した次の実験式により示されるものとする。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_y(x) &= \frac{1}{\sqrt{2}} C_y x^{(1-\frac{n}{2})} \\ \sigma_z(x) &= \frac{1}{\sqrt{2}} C_z x^{(1-\frac{n}{2})} \end{aligned} \right\} (9)$$

ここで、 n は大気不安定度パラメータであり、 C_y 、 C_z はSuttonの拡散係数である。 C_y 、 C_z は高度10 m以下の接地気層内では次と表わされる。

$$\left. \begin{aligned} C_z &= \exp\{5.53(n+0.6)^2 - 4.39(n+0.6) - 1\} \\ C_y &= 0.58 C_z \end{aligned} \right\} (10)$$

また、風速 $u(z)$ は高度10 m (z_0)での風速を u_0 とすると次式で表わされるものとする。

$$u(z) = u_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^{\frac{n}{2-n}} \quad (11)$$

ここで次式で定義する濃度 $C^*(x, y)$ を鉛直方向積算濃度と呼び、地表面との放射熱伝達に関する煙側の代表特性値とする。なお、以上から C'' は x と n の関数となる。

$$\begin{aligned} C^*(x, y) &= \int_0^{+\infty} C(x, y, z) dz \\ &= \int_0^{+\infty} \left(\frac{Q_0}{u_0} \right) \frac{1}{C''(x, n)} F(x, y) F(x, z) dz \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{Q_0}{u_0} \right) \frac{1}{C''(x, n)} F(x, y) \end{aligned} \quad (12)$$

(ii) 地表面の温度 $T(x, y, t)$

地中の温度分布の過渡変化を示す微分方程式、初期および境界条件は次と表わされる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K_1 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (13)$$

$$T_{t=0} = T_0 \quad (14)$$

$$-\gamma_1 c_1 K_1 \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} = L - A - D \quad (15)$$

ここで、 t は日没時を基点とした時間、 T_0 は日没時の地表面および地中温度である。また、 L は(夜間)放射の熱流束、 A は大気の渦拡散による熱流束、 D は水蒸気の凝縮熱流束を示している。 $A=D=0$ とおき、 L に対し前述の条件を適応すると式(13)～式(15)の解は次式となる。

$$T = T_0 - \frac{2L}{\sqrt{\pi} \rho_1 c_1 \sqrt{K_1}} \sqrt{t} \quad (16)$$

ただし、これ以降 $L=L(x, y, t)$ とする。

(iii) 放射の熱伝達量 $L(x, y, t)$

① 夜間大気の放射熱量 $R_1(T, e(T_0))$

夜間は地表面が熱源となるため、大気が熱平衡状態にあるとすると、大気から地表面へのみかけの放射熱量は、地表面を放射熱の熱源とする、大気層による反射熱と、大気層の温度に関連した放射熱伝達量の和となる。したがって、地表面温度を代表温度として、大気層の夜間の放射率が測定されてきている。代表的なものとしてはÅngström, Elsasser, Bruntによる実験公式⁵⁾があるが、ここでは良く現象と合うとされているBruntによる次式を用い、係数 a_R, b_R を山本による値とする。

$$R_1/\sigma T^4 \equiv \epsilon_f = a_R + b_R \sqrt{e} \quad (17)$$

ここで、 $a_R=0.51$ 、 $b_R=0.066$ である。 e は(飽和)水蒸気圧(mb)を示し、近似的に日没時での値 $e(T_0)$ とする。

② 煙粒子層の放射熱量 R_2 (T, C*)

地表面から煙粒子層へ放射された熱の一部は煙粒子層に吸収され、同一吸収場所から同一吸収量が再放射されて、その一部は再び地表面へ戻り吸収される。この割合は煙粒子層のみかけ上の反射率とみなすことができる。その値 ϵ_R は煙粒子層の鉛直方向の光学距離を τ_0 とするとき、次式により求められる。

$$R_2/\sigma T^4 \equiv \epsilon_R$$

$$= \int_0^{\tau_0} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-\tau}}{\pi l^2} \cos \phi \, dy \, dx \right\} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-\tau}}{4\pi l^2} \cos \phi \, dy \, dx \right\} d\tau \quad (18)$$

$$= \int_0^{\tau_0} E_2^2(\tau) \, d\tau \quad (18')$$

ここで、 $E_2(\tau)$ は指数積分関数⁶⁾で次式により定義され、式(19')より求められる。

$$E_n(\tau) = \int_0^1 \mu^{n-2} \exp(-\tau/\mu) \, d\mu \quad (n=1, 2, \dots) \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} E_1(\tau) &= -\gamma_0 - \ln|\tau| + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{\tau^n}{n \cdot n!} \\ nE_{n+1}(\tau) &= \exp(-\tau) - \tau E_n(\tau) \\ \gamma_0 &= 0.5772156 \quad (\text{Euler の定数}) \end{aligned} \right\} (19')$$

③ 煙粒子層から地表面への放射熱量 R_3 (T, C*)

煙粒子層から地表面への放射熱量は煙粒子層のみかけの放射率を ϵ_s とするとき次式により求められる。

$$R_3/\sigma T^4 \equiv \epsilon_s$$

$$= 4 \int_0^{\tau_0} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-\tau}}{4\pi l^2} \cos \phi \, dy \, dx \right] d\tau \quad (20)$$

$$= 2 \int_0^{\tau_0} E_2(\tau) \, d\tau \quad (20')$$

④ 煙粒子層を透過する放射熱量 $R'_4(T, C^*)$

煙粒子層の透過率 δ_w は次式として表わされる。

$$R'_4/\sigma T^4 \equiv \delta_w$$

$$= \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-\tau}}{\pi l^2} \cos^2 \phi \, dy dx \right]_{\tau_0} \quad (21)$$

$$= 2E_3(\tau_0) \quad (21')$$

$$\approx e^{-1.8\tau_0} \quad (22)$$

⑤ 煙粒子層のみかけ上の鉛直方向の光学距離 $\tau_0(a\gamma_s, C^*)$

煙粒子の層に鉛直に入射した(赤外)放射線は煙粒子の濃度, すなわち積分濃度に比例して減衰し, 煙粒子層を灰色体とみなすと透過率 δ_w は次式と表わされる。

$$\delta_w = e^{-a\gamma_s C^*} \quad (23)$$

したがって, 式(21')と式(23)との比較および式(22)と式(23)との比較により τ_0 は次となる。

$$\tau_0 = E_3^{-1} \left(\frac{e^{-a\gamma_s C^*}}{2} \right) \quad (24)$$

$$\approx a\gamma_s C^*/1.8 \quad (25)$$

ここで, a は煙粒子層の放射減衰係数(質量吸収係数), γ_s は煙粒子の比重量, C^* は式(12)より求められる煙粒子の鉛直方向積算濃度を示す。なお, a は煙粒子の大きさや煙粒子構成物質の赤外線吸収特性により異なる値をとる。

⑥ 放射熱流束 $L(T, T_0, t)$, $L^*(T, T^*, T_0, C^*, t)$

①~④において求めた放射熱量 R を整理すると次の放射熱流束 L , L^* を得る。ここで, $*$ は煙煙時の値であることを示す。

(a) 煙煙を施さない場合 $L(T, T_0, t)$

$$L = R_0 - R_1 = (1 - \epsilon_f) R_0 \quad (26)$$

ここで, R_0 は煙煙を施さない地表面(温度 $T(t)$)からの放射熱量であり, 次式による。

$$R_0 = \sigma T^4(t) \quad (27)$$

(b) 煙煙を施す場合 $L^*(T, T^*, T_0, C^*, t)$

$$L^* = R_0^* - R_2^* - R_3 - R_4 = (1 - \epsilon_R) R_0^* - (\epsilon_s + \delta_w \epsilon_f) R_0 \quad (28)$$

なお、系の条件からすると $R_4 = \epsilon_f \delta_w \left\{ \epsilon_s R_0 + (\epsilon_R + \delta_w) R_0^* \right\} / (1 - \epsilon_f \epsilon_R) + \epsilon_f \epsilon_f R_0 R_0$ となるが、燻煙を行なう領域は狭いことを考え、右辺第1項に対しては $\epsilon_s = \epsilon_R = 0$, $\delta_w = 1$, $R_0^* = R_0$ とおき、第2項には一般に ϵ_R は大きな値とならないことから $\epsilon_f \epsilon_R = 0$ とおき、 $R_4 = \epsilon_f R_4 = \epsilon_s \delta_w R_0$ としている。ここで、 R_0^* は次式による。

$$R_0^* = \sigma T^{*4}(t) \quad (29)$$

(iv) 地表面温 T の算出

時間 t 後の地表面温度 T(t), $T^*(t)$ は式(16)と式(26), (28) から次となる。

(a) 燻煙を施さない場合

$$C_1 T^4 + T - T_0 = 0 \quad (30)$$

ここで、係数は次式による。

$$C_1 = (1 - \epsilon_f) \sigma B \sqrt{t} \quad B = 2 / (\sqrt{\pi} \gamma_1 c_1 \sqrt{K_1}) \quad (31)(31')$$

(b) 燻煙を施す場合

$$C_1^* T^{*4} + T^* - C_2^* = 0 \quad (32)$$

ここで、係数は次式による。また、T は式(30)の解とする。

$$C_1^* = (1 - \epsilon_R) \sigma B \sqrt{t} \quad (33)$$

$$C_2^* = (T_0 + \epsilon_s + \epsilon_f \delta_w) B \sqrt{t} \sigma T^4 \quad (34)$$

これらの4次方程式の題意に適した解が求める地表面温度である。

(v) 相似変数 Π

従属変数 T^* は次と表わされる。

$$T^* = T^*(x, y, t; C^*, L^*, T_0, B) \quad (35)$$

ここで、x, y, t は独立変数であり、 C^* , L^* は次と表わされる。

$$C^* = C^*(x, y; Q_0/u_0, u) \quad (36)$$

$$L^* = L^*(x, y, t; T_0, a\gamma_s, C^*, B) \quad (37)$$

したがって、 T^* は次と表わされる。

$$T^*(x, y, t; Q_0/u_0, a\gamma_s, B) \quad (38)$$

ここでいくつかの無次元数を導入できるが、系の状態を示す相似変数として重要なものは次式で示す Π である。

$$\Pi \equiv \left(\frac{\kappa_0}{u_0 y_0} \right) (a \gamma_s) \quad (39)$$

Π は図2に示すような流れを考えると、 (Q_0/u_0) が流れを横切る斜線を示し、 y 方向の代表長さを y_0 (ここでは点源からの煙の発生を考えているので単位長さ、すなわち1とする)とすると鉛直方向の代表長さ z^* は $\left(\frac{Q_0}{u_0 y_0} \right)$ となり、この方向は放射熱伝達を考える代表方向と一致し、また $a\gamma_s$ は煙粒子層の放射吸収(減衰)係数を意味し、両者の積は流れ場における放射性流体の代表光学距離とみなすことができる。すなわち、 Π は濃度場と放射熱伝達場を結ぶ変数であり、 n が一定、すなわち大気の状態が一定のとき、濃度場と放射熱伝達場は Π によって一義的に性格づけられ、 Π は相似変数とみなされる。したがって、 T^* は次と表わされ、耕地微気象を設定した場合には式(41)と書かれる。

$$T^* = T^*(x, y, t; \Pi, n, T_0, B)$$

$$\text{ただし、} C^* = C^*(x, y; Q_0/u_0, n) \quad (40)$$

$$T^* = T^*(x, y, t; \Pi, T_0, B)$$

$$\text{ただし、} C^* = C^*(x, y; Q_0/u_0) \quad (41)$$

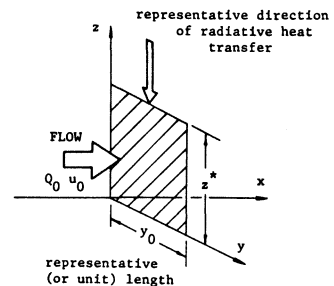


図2 煙粒子層の代表長さ z^*

3. 計算例とその検討

大気状態を平穩，晴天 ($n=0.25$) とした場合の計算例を示す。代表例としては，日没時の地表温度 $T_0=15^\circ\text{C}$ ，土を普通の裸地 $B=3.70^\circ\text{K m}^2\text{sec}^{1/2}\text{kcal}$ とし，煙煙量は努力目標として多目の $Q_0/u_0=1.0\text{ m}^2$ ， $a\gamma_s$ は古タイヤの燃焼時を想定し $a\gamma_s=5.0$ すなわち $\Pi=5.0$ とする。なお，式 (41) の T_0 ， B はパラメータとし， $T_0=5, 10^\circ\text{C}$ ， $B=1.85^\circ\text{K m}^2\text{sec}^{1/2}/\text{kcal}$ (水分を多く含む土壌)， $7.40^\circ\text{K m}^2\text{sec}^{1/2}/\text{kcal}$ (乾燥した砂地) とする。

3. 1 煙粒子の濃度分布

煙粒子の濃度分布を図3に示す。煙煙源 ($x=0$ ， $y=0$) 近傍および源の下流側近傍 ($y=0$) での C^* は高い値をとるが，この領域を離れると C^* の値は急激に低くなる。4-2において述べるが，煙粒子層の光学距離 τ_0 は 10^{-2} 以上でなければ保温効果はあまり無く，とくに $\tau_0=5 \times 10^{-2} \sim 10^0$ の範囲では保温効果の増加は著しいが，これ以上の値では濃度の増加ほどには保温効果の増加は期待できない。(τ_0 を式 (25) を用いて C^* に換算すると， $\tau_0=10^{-2}$ で $C^*=0.0035\text{ m}^3/\text{m}^2$ ， $\tau_0=5 \times 10^{-2}$ で $C^*=0.018\text{ m}^3/\text{m}^2$ ， $\tau_0=10^0$ で $C^*=0.36\text{ m}^3/\text{m}^2$ を得る。) したがって，作柄に対し固有の霜害危険温度以上の高温での過剰な保温よりは，その温度付近に地表面温度を保つことが重要であり，人為的に C^* の分布を変え，必要な濃度に分布を制御することが，煙煙を有効に利用する上で必要なことである。

3. 2 放射熱伝達に関する特性値

夜間の大気層のみかけ上の放射率 ϵ_f を図4に示す。また，煙粒子層のみかけ上の反射率 ϵ_R ，放射率 ϵ_s および透過率 δ_w を図5に示す。

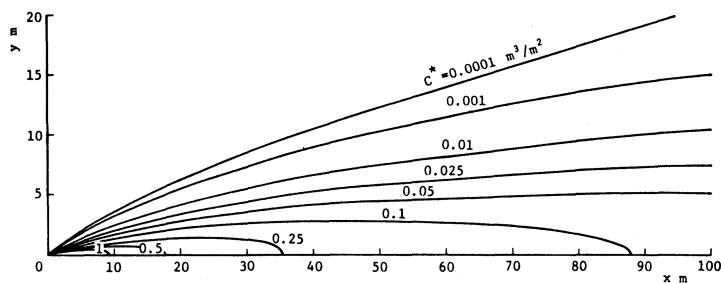


図3 煙粒子層の鉛直方向積算濃度の分布

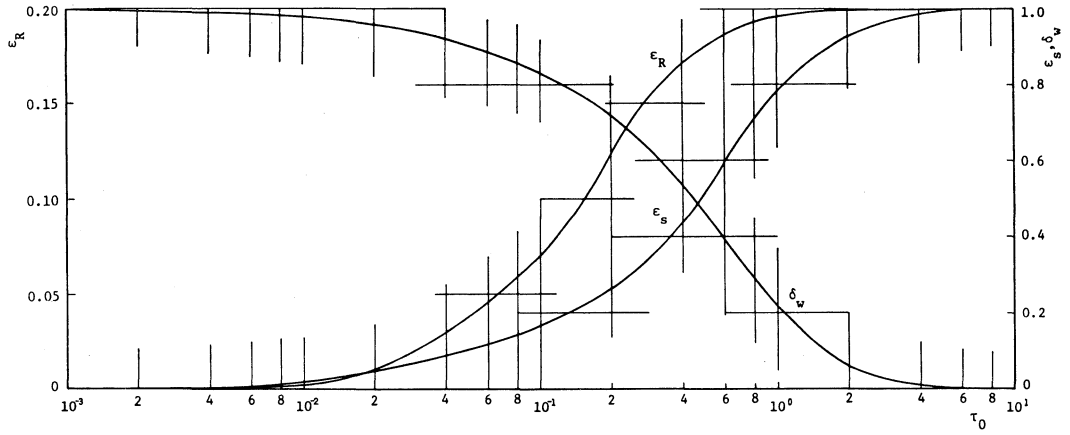


図5 煙粒子層のみかけ上の反射率 ϵ_R , 放射率 ϵ_S , 透過率 δ_w

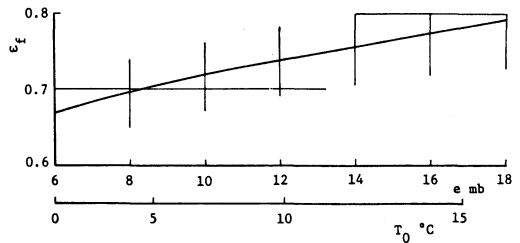
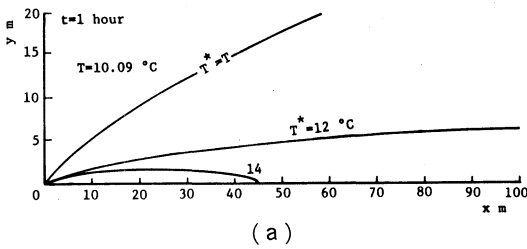


図4 大気層の夜間のみかけ上の放射率 ϵ_f

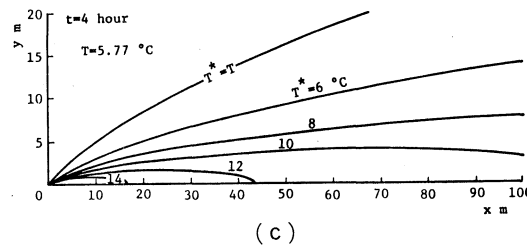
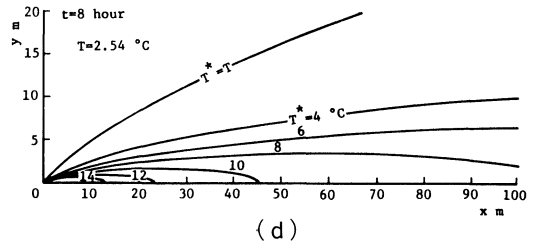
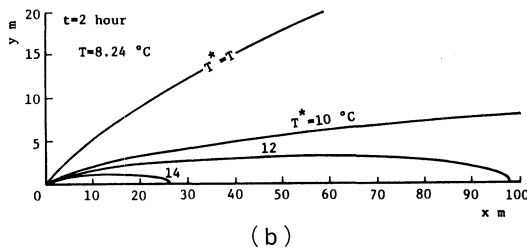


図6 地表面温度の経時変化

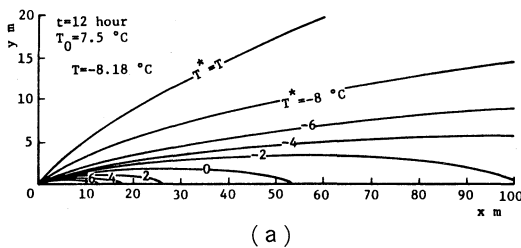
3. 3 地表面の温度分布

(1) 経時変化

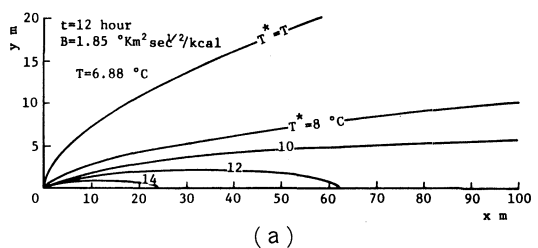
代表例についての経時変化を図6に示す。燻煙を施さない場合には、日没2時間位で地表面温度は急激に低下し、また12時間後には 0°C 近傍にまで低下する。これに対し、燻煙粒子濃度の高い燻煙源のすぐ下流ではほとんど温度の低下はみられない。また、たとえば霜害危険温度が 6°C であるとすると、12時間後のその温度の領域は幅約6m、長さ100m以上となり、燻煙を行なう燻煙源の間隔は6m程度とするとよいことがわかる。一方、図3との比較から、12時間後に 6°C に保つには、煙粒子濃度が約 $0.07\text{ m}^3/\text{m}^3$ 以上であれば良いことがわかり、それ以上の濃度は過剰であり、その煙粒子を低濃度側へ移動せしめると、霜害危険温度程度の領域を広げることができる。

(ii) 日没時の地表面温度による差異

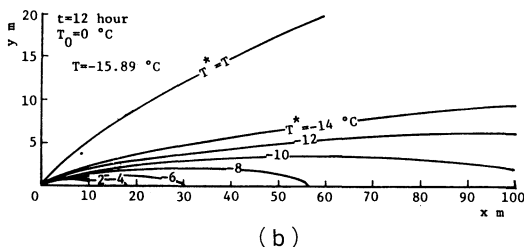
T_0 の違いによる12時間後の地表面の温度分布の差異を図7に示す。同図(a)は $T_0=7.5^{\circ}\text{C}$ 、同図(b)は $T_0=0^{\circ}\text{C}$ の場合の結果であり、他の条件は代表例において設定した値と同一である。 T_0 の低い場合の方が、日没時からの温度差が大きく、また保温効果も低い。しかし、本計算例の範囲では T_0 の違いによる温度差および保温効果の差異は少ない。



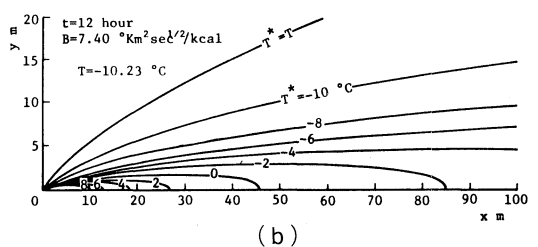
(a)



(a)



(b)



(b)

図7 日没時の地表面温度による差異

図8 土壤の熱物性値による差異

(iii) 土壤の熱物性値による差異

Bの違いによる12時間後の地表面の温度分布の差異を図8に示す。同図(a)は $B=1.85^{\circ}\text{K m}^2\text{sec}^{1/2}\text{kcal}$ 、同図(b)は $B=7.40^{\circ}\text{K m}^2\text{sec}^{1/2}\text{kcal}$ を示し、前者は湿った土壤、後者は乾いた土壤を示す。燻煙の有無にかかわらず地表面温度は(図16および)式(16)からBすなわち $\frac{2}{\sqrt{\pi} \rho_1 c_1 \sqrt{K_1}}$ にほぼ比例して変化することがわかる。したがって、土壤の熱物性値の正確な推定は、一般的な霜害の推定および燻煙の有効な利用上からも重要である。

4. 燻煙による保温効果の近似的な推定方法

第2章で示した基礎方程式は小型の計算機を用い数値計算を行なうことができず実用的ではないので、本章では近似式による保温効果の推定方法と図による推定方法を示す。

4.1 近似式による保温効果の推定

(i) 燻粒子濃度に関する近似式

接地気層内の速度分布を図9に示す。地表面($z/z_0=0$)近傍を除き $u(z)/u_0$ はほぼ1となる。したがって、ここでは $u(z)/u_0=1$ 、すなわち $C''=1/2$ と近似する。このとき、式(12)は次式となる。

$$C^*(x, y) = \left(\frac{Q_0}{u_0} \right) \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y(x)} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)} \right) \quad (42)$$

ここで、 $\sigma_y(x)$ は式(9)および式(10)より計算される。

(ii) 放射特性値の近似式

夜間大気層の放射率 ϵ_f は式(17)、燻粒子層の透過率 δ_w は式(23)、煙粒子層の光学距離 τ_0 は式(25)より計算し、煙粒子層の放射率 ϵ_R および放射率 ϵ_S は次の多項式により近似する。

$$\epsilon_R(\tau_0) = \exp(\tau_{01}) - 10^{-6} \quad (43)$$

$$\epsilon_S(\tau_0) = \exp(\tau_{03}) - 10^{-6} \quad (44)$$

ただし、 τ_{01} 、 τ_{03} は次による。

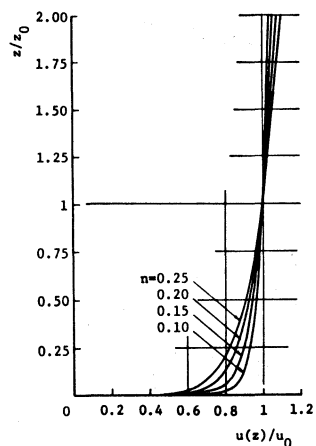


図9 気流の速度分布

$$\begin{aligned} \tau_{01} &= -1.6278 \\ &+ 1.3544 \times 10^{-1} \times \tau_{02} - 1.5416 \times 10^{-1} \times \tau_{02}^2 \\ &- 5.8505 \times 10^{-3} \times \tau_{02}^3 + 1.2117 \times 10^{-3} \times \tau_{02}^4 \\ &+ 1.3552 \times 10^{-4} \times \tau_{02}^5 + 3.9760 \times 10^{-6} \times \tau_{02}^6 \\ \tau_{02} &= \log_e (\tau_0 + 10^{-6}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{03} &= -3.2274 \times 10^{-1} \\ &+ 4.2168 \times 10^{-1} \times \tau_{04} - 1.0255 \times 10^{-1} \times \tau_{04}^2 \\ &- 6.6243 \times 10^{-3} \times \tau_{04}^3 - 7.0059 \times 10^{-4} \times \tau_{04}^4 \\ &- 1.2245 \times 10^{-4} \times \tau_{04}^5 - 4.6866 \times 10^{-6} \times \tau_{04}^6 \\ &+ 1.6380 \times 10^{-7} \times \tau_{04}^7 - 1.3135 \times 10^{-8} \times \tau_{04}^8 \\ &- 1.3139 \times 10^{-9} \times \tau_{04}^9 \\ \tau_{04} &= \log_e (\tau_0 + 10^{-6}) \end{aligned}$$

(iii) 地表面温度の算出に関する近似式

地表面温度は式(30), (32)の4次方程式を解くことにより求められるが, 実用的ではないので, 温度 T , T^* に線型化を施し簡略化する。時間 t 後の温度降下量を次式に示す $\Delta T(t)$ とし, T^* を Maclaurin 展開し, 一次の項までをとると式(47)を得る。

$$\Delta T(t) \equiv T_0 - T(t) \quad (45)$$

$$T^4 = (T_0 - \Delta T)^4 = T_0^4 (1 - \Delta T/T_0)^4 \quad (46)$$

$$\approx T_0^3 (T_0 - 4\Delta T) \quad (47)$$

(a) 燻煙を施さない場合

放射熱流束 L は次式と近似できることから, ΔT は式(49)と表わされる。

$$L = (1 - \epsilon_r) \sigma T_0^3 (T_0 - 4\Delta T) \quad (48)$$

$$\Delta T = \frac{f_1 T_0 \sqrt{t}}{1 + 4f_1 \sqrt{t}} \quad (49)$$

ここで, f_1 は次の値をとる。

$$f_1 = B(1 - \epsilon_r) \sigma T_0^3 \quad (50)$$

(b) 燻煙を施す場合

放射熱流束 L^* は次式と近似できることから, 燻煙時の温度降下量 $\Delta T^*(t)$ は式(53)と表わさ

れる。

$$L^* = (1 - \epsilon_R) \sigma T_0^3 (T_0 - 4\Delta T^*) - (\epsilon_s + \epsilon_f \delta_w) \sigma T_0^3 (T_0 - 4\Delta T) \tag{51}$$

$$\Delta T^* \equiv T_0 - T^*(t) \tag{52}$$

$$= \frac{T_0 (f_1^* - f_2^* + \frac{4f_1 f_2^* \sqrt{t}}{1 + 4f_1 \sqrt{t}}) \sqrt{t}}{1 + 4f_1^* \sqrt{t}} \tag{53}$$

ここで、 f_1^* 、 f_2^* は次の値をとる。

$$\left. \begin{aligned} f_1^* &= B(1 - \epsilon_R) \sigma T_0^3 \\ f_2^* &= B(\epsilon_s + \epsilon_f \delta_w) \sigma T_0^3 \end{aligned} \right\} \tag{54}$$

なお、式(47)の近似による打ち切り誤差は第3章の計算範囲内で最大約-0.86%程度である。

ここで、燻煙による保温効果の程度を示すため、次式により農地の保温効率(温度基準) Φ を定義すると、以上の諸式により Φ は式(56)と表わされる。

$$\Phi(x, y, t; \tau_0(c^*), T_0, B) \equiv \frac{T^*(t) - T(t)}{T_0 - T(t)} = 1 - \frac{\Delta T^*}{\Delta T} \tag{55}$$

$$= 1 - \left(\frac{1 + 4f_1 \sqrt{t}}{1 + 4f_1^* \sqrt{t}} \right) \left(\frac{1 - \epsilon_R}{1 - \epsilon_f} - \frac{\epsilon_s + \epsilon_f \delta_w}{1 - \epsilon_f} + \frac{4f_2^* \sqrt{t}}{1 + 4f_1 \sqrt{t}} \right) \tag{56}$$

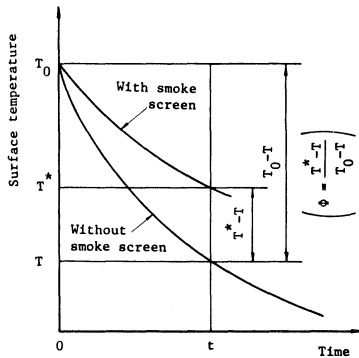


図10 農地の保温効率 Φ

Φ は図10に示すように、燻煙を施さない地表面のt時間後の温度降下量($T_0 - T(t)$)のうち何パーセントが燻煙により保温されているかを示す値であり、0の場合には燻煙の効果は全く無く、燻煙を施さない地表面温度と同一温度となることを意味し、100%の場合には保温効果は完全で、日没時の地表面温度のまま、何ら温度降下のないことを意味している。

4. 2 図による保温効果の推定

煙粒子の濃度 $C^*(x, y; Q_0/u_0, n)$, 非燻煙時の地表温度の降下量 $\Delta T(t; T_0, B)$ および保温効率 $\Phi(x, y, t; \tau_0, T_0, B)$ に対し, あらかじめある基準値 (添字 Ref) を定めておき, 時間 t , 燻煙量 Q_0/u_0 , 大気不安定度パラメータ n , 日没時の地表面温度 T_0 , 土壌の熱物性値 B による補正図を作成し, 基準値の補正を行ない, 設定した条件下での C^* , ΔT , Φ を求める。また, 煙粒子層の光学距離 $\tau_0(C^*, a\gamma_s)$ と C^* との関係については, 煙粒子層の放射吸収係数 $a\gamma_0$ を仲介とした変換図を作成し用いる。なお, $\Delta T(t)$ と $\Phi(x, y, t)$ を用いると燻煙を行なっている地表面の温度は容易に算出される。

(1) 保温効果の推定用補正式

(a) 煙粒子の濃度 $C^*(x, y; Q_0/u_0, n)$ について

C^*_{Ref} を次式により補正し C^* とする。

$$C^*(x, y; Q_0/u_0, n) = C^*_{\text{Ref}}(x, y) \cdot \left(\frac{Q_0}{u_0} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_n(x, y; n)}{\sigma_n(x, y)_{\text{Ref}}} \right) \quad (57)$$

ここで, $C^*_{\text{Ref}}(x, y)$, $\sigma_n(x, y, n)$, $\sigma_n(x, y)_{\text{Ref}}$ は次式による。

$$C^*_{\text{Ref}}(x, y) = C^*(x, y; 1, 2.5) \quad (58)$$

$$\sigma_n(x, y; n) = \frac{1}{\sigma_y(x, n)} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y(x, n)}\right) \quad (59)$$

$$\sigma_n(x, y)_{\text{Ref}} = \sigma_n(x, y; 2.5) \quad (60)$$

ただし, n の影響については式(42)を導く場合に用いたのと同様の近似を用いている。

(b) 非燻煙時の地表面温度の降下量 $\Delta T(t; T_0, B)$ について

ΔT_t を次式により補正し ΔT とする。

$$\Delta T(t; T_0, B) = \Delta T_t(t) \cdot \delta T_0(T_0) \cdot \delta_B(B) \quad (61)$$

ここで, $\Delta T_t(t)$, $\delta T_0(T_0)$, $\delta_B(B)$ は次式による。

$$\Delta T_t(t) = \Delta T(t; 283, 3.5) \quad (62)$$

$$\delta T_0(T_0) = \Delta T(12; T_0, 3.5) / \Delta T_{\text{Ref}} \quad (63)$$

$$\delta_B(B) = \Delta T(12; 283, B) / \Delta T_{\text{Ref}} \quad (64)$$

$$\Delta T_{\text{Ref}} = \Delta T(12; 283, 3.5) \quad (65)$$

(c) 燻煙による農地の保温効率 $\Phi(x, y, t; \tau_0, T_0, B)$ について Φ_{τ_0} を次式により補正し Φ とする。

$$\Phi(x, y, t; \tau_0, T_0, B) = \Phi_{\tau_0}(\tau_0) \cdot \phi_t(t) \cdot \phi_{T_0}(T_0) \cdot \phi_B(B) \quad (66)$$

ここで、 $\Phi_{\tau_0}(\tau_0)$ 、 $\phi_t(t)$ 、 $\phi_{T_0}(T_0)$ 、 $\phi_B(B)$ は次式による。

$$\Phi_{\tau_0}(\tau_0) = \Phi(x, y, 12; \tau_0, 283, 3.5) \quad (67)$$

$$\phi_t(t) = \Phi(x, y, t; 5 \times 10^{-2}, 283, 3.5) / \Phi_{\text{Ref}}(x, y) \quad (68)$$

$$\phi_{T_0}(T_0) = \Phi(x, y, 12; 5 \times 10^{-2}, T_0, 3.5) / \Phi_{\text{Ref}}(x, y) \quad (69)$$

$$\phi_B(B) = \Phi(x, y, 12; 5 \times 10^{-2}, 283, B) / \Phi_{\text{Ref}}(x, y) \quad (70)$$

$$\Phi_{\text{Ref}}(x, y) = \Phi(x, y, 12; 5 \times 10^{-2}, 283, 3.5) \quad (71)$$

ただし、 τ_0 の関数関係は、 $\tau_0(C^*(x, y; Q_0/u_0, n))$ であり、 C^* からの変換は式(25)による。

(d) 農地の地表面温度 $T(t)$ 、 $T^*(x, y, t)$ の算出

非燻煙時の地表面温度 $T(t)$ および燻煙時の地表面温度 $T^*(x, y, t)$ は、以上の方法により算出された $\Delta T(t)$ と $\Phi(x, y, t)$ を用い次式により算出される。

$$T(t) = T_0 - \Delta T(t) \quad (72)$$

$$T^*(x, y, t) = T_0 - (1 - \Phi(x, y, t)) \cdot \Delta T(t) \quad (73)$$

(ii) 保温効果を推定するのに用いる基準値および補正値の図

$C^*_{\text{Ref}}(x, y)$ を図 11 に、 $\sigma_n(x, y, n)$ を図 12 に、 $\tau_0(C^*)$ を図 13 に、 $\Delta T_1(T)$ を図 14 に、 $\delta T_0(T_0)$ および $\phi_{T_0}(T_0)$ を図 15 に、 $\phi_B(B)$ および $\phi_B(B)$ を図 16 に、 $\Phi_{\tau_0}(\tau_0)$ を図 17 に示す。なお、基準値の算出に用いた諸量を表 1 にまとめて示す。

実用的な範囲内で補正量についてみると、 n による補正量は x, y の値の小さな領域で大きく、また複雑である。 T_0 による補正量は少ないが、 B による補正量は大きいことがわかる。

また、図 17 により、煙粒子層の光学距離 τ_0 は 10^{-2} 程度以上でなければ保温効果はあまり無く、とくに $\tau_0 = 5 \times 10^{-2} \sim 10^0$ の範囲内では τ_0 の増加に伴う保温効果の増加は著しいが、これ以上では τ_0 の増加ほどには保温効果を期待しえないことがわかる。これは放射性流体による熱遮蔽効果の大きな特徴であり、工学的にも利用し得る。

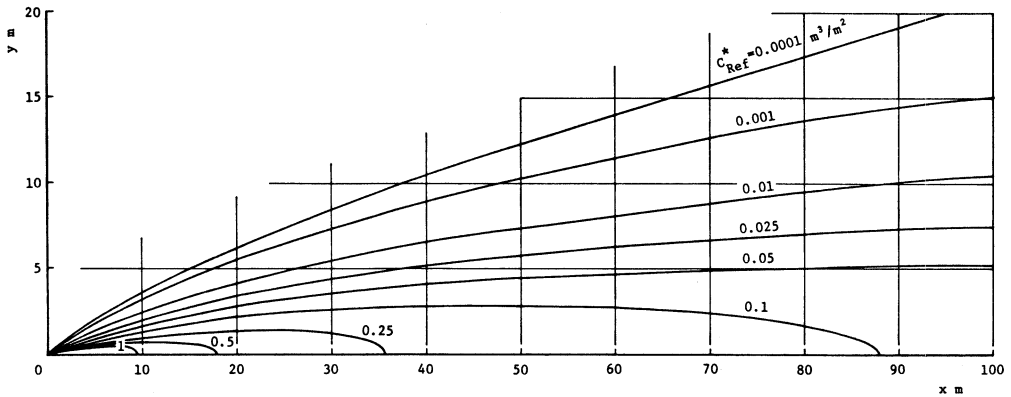


図 11 基準条件下での煙粒子の積算濃度の分布

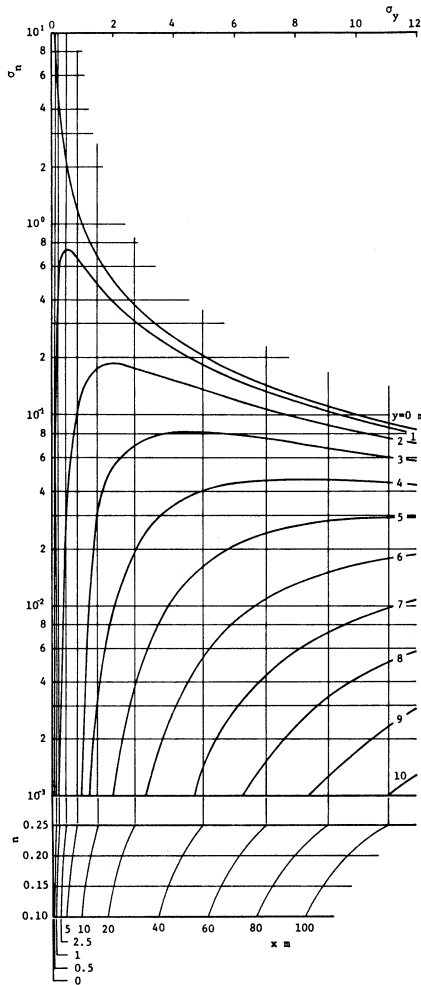


図 12 C^*_{Ref} の安定度パラメータによる補正図

表 1 基準値 (Ref) の算出に用いた値

$Q_0/u_0 = 1$ (m^3/sec)/(m/sec)
$n = 0.25$
$t = 12$ hour
$\tau_0 = 5 \times 10^2$
$T_0 = 283$ °K (10 °C)
$B = 3.5$ °K 2 sec $^{1/2}$ /kcal

表 2 古タイヤの燃焼時の組成および種々の煙の放射減衰係数

smoke particle content : 88 %w/w	smoke : 72 %w/w
ash content : 12 %w/w	soot : 16 %w/w
specific weight of smoke particle : $\gamma_s = 125$ g/m 3	
radiative absorption coefficient	
smoke of tobacco	: $a = 0.034$ m 2 /g
dead leaf	: 0.039
smoke candle	: 0.044
oily smoke	: 0.049

(iii) 保温効果の推定例

(a) 煙粒子の物性および燻煙量の例

古タイヤの小片 (断面 3.5 mm × 3.5 mm) を燃焼させた場合の組成を表 2 に示す。なお、同表には種々の煙の放射減衰係数 a^2 の値も併記しておく。

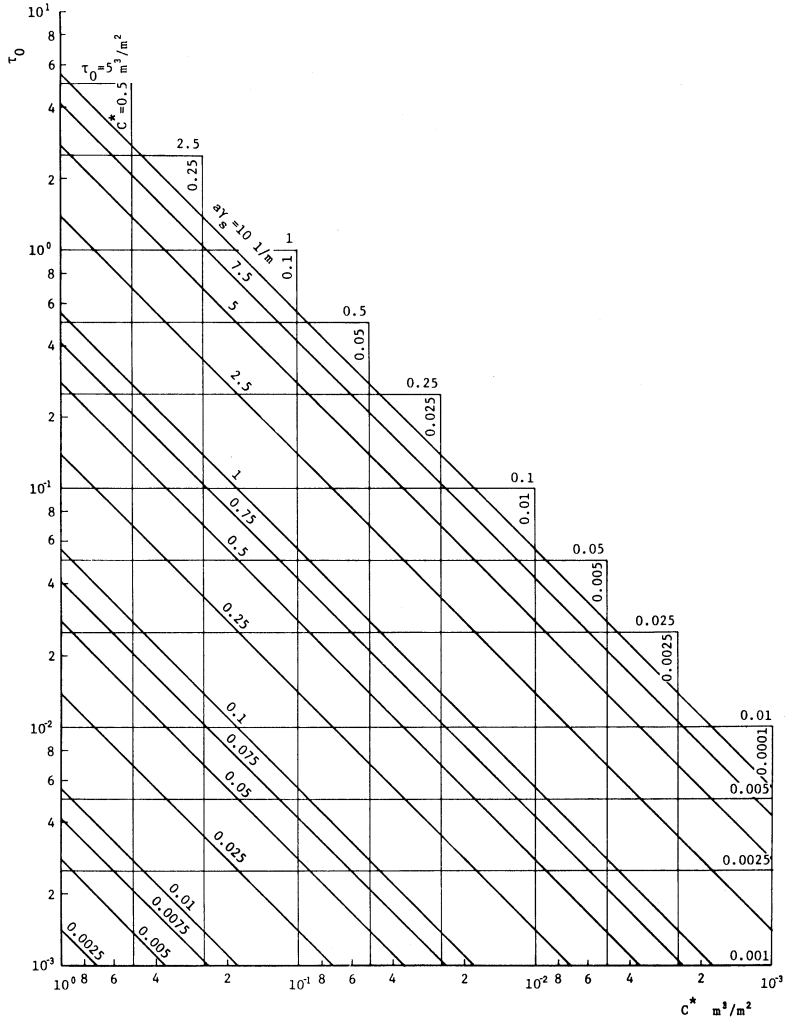


図 13 光学距離 τ_0 と積算濃度 C^* の関係

表 2 の値から、たとえば 5 kg の古タイヤを 1 時間で燃焼させた場合に発生する煙粒子量 ΔQ_0 が算出され、 $\Delta Q_0 = 9.78 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$ となる。また、煙を油性媒とみなすと $a\gamma_s = 6.13 \text{ l/m}$ となるが、タイヤの燃焼時に発生する煙は大きな粒子の煤を含み、また煤濃度も高いので、この値よりは高い値をとるものと考えられる。なお、 Π の値はタイヤの本数を m 本/hour とすると次式より算出される。

$$\Pi = m \times \left(\frac{\Delta Q_0}{u_0} \right) (a\gamma_s) \tag{74}$$

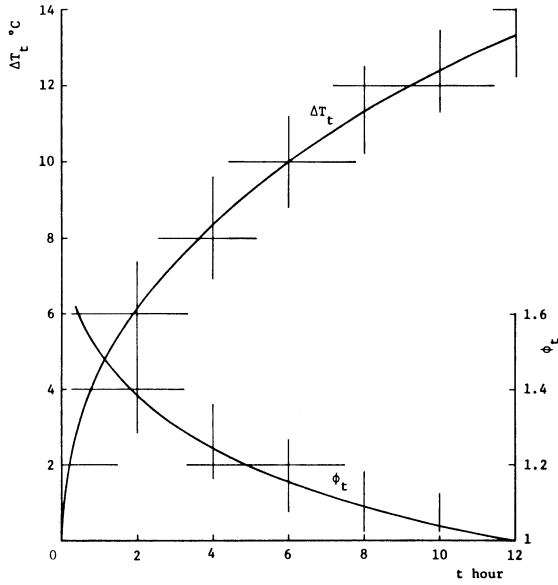


図14 非燻煙時の地表面温度の降下量 ΔT_c と基準条件下での ΔT_{Ref} の時間 t による補正図

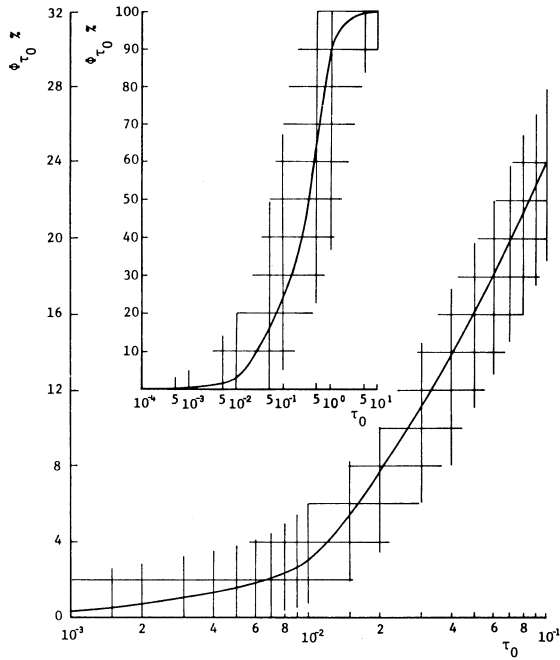


図17 光学距離 τ_0 と農地の保温効果 Φ との関係

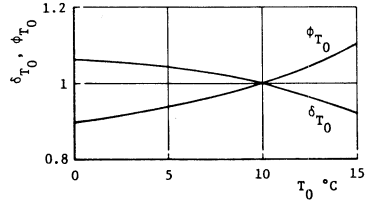


図15 C^*_{Ref} と ΔT_{Ref} の日没時の地表面温度 T_0 による補正図

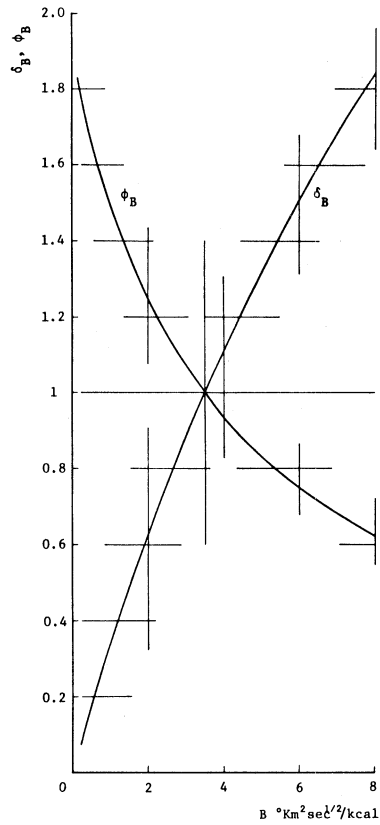


図16 C^*_{Ref} と ΔT_{Ref} 土壤の熱物性値 B による補正図

表3 図による農地表面温度の推定例

T_0	*K	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288
T_0	-	5×10^3	5×10^3	5×10^3	5×10^3	5×10^3	5×10^3	5×10^3	5×10^3	5×10^3	5×10^3	5×10^3	5×10^3
B	* $\text{Km}^2 \text{sec}^2 / \text{kcal}$	1.5	1.5	1.5	5.5	5.5	5.5	1.5	1.5	1.5	5.5	5.5	5.5
c	hour	6	9	12	6	9	12	6	9	12	6	9	12
ΔT_t	(Fig.14)	10.00	11.87	13.36	10.00	11.87	13.36	10.00	11.87	13.36	10.00	11.87	13.36
δT_t	(Fig.15)	0.9222	0.9222	0.9222	0.9222	0.9222	0.9222	0.9222	0.9222	0.9222	0.9222	0.9222	0.9222
δ_B	(Fig.16)	0.4805	0.4805	0.4805	1.4177	1.4177	1.4177	0.4805	0.4805	0.4805	1.4177	1.4177	1.4177
ΔT_{II}	(Eq.61)	4.43	5.26	5.92	13.07	15.52	17.47	4.43	5.26	5.92	13.07	15.79	17.63
ΔT_I	(exact)	4.24	5.12	5.85	13.43	15.57	17.63	4.24	5.12	5.85	13.43	15.79	17.63
ϕ_{T_0}	(Fig.17)	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	1.63	65.88	65.88	65.88	65.88	65.88	65.88
ϕ_{T_t}	(Fig.14)	1.157	1.066	1	1.157	1.066	1	1.157	1.066	1	1.157	1.066	1
ϕ_{T_0}	(Fig.15)	1.1039	1.1039	1.1039	1.1039	1.1039	1.1039	1.1039	1.1039	1.1039	1.1039	1.1039	1.1039
ϕ_B	(Fig.16)	1.359	1.359	1.359	0.791	0.791	0.791	1.359	1.359	1.359	0.791	0.791	0.791
ϕ_{II}	(Eq.66)	2.83	2.61	2.45	1.65	1.52	1.42	100.00	100.00	98.83	66.56	61.32	57.53
ϕ_I	(exact)	2.70	2.57	2.47	1.70	1.52	1.40	100.00	97.54	94.29	67.55	61.20	56.70
T_{II}	(Eq.72) °C	10.57	9.74	9.08	1.93	-0.52	-2.47	10.57	9.70	9.08	1.93	-0.52	-2.47
T_I	(exact) °C	10.76	9.88	9.15	1.57	-0.79	-2.63	10.76	9.88	9.15	1.57	-0.79	-2.63
c	(error) %	-4.48	-2.73	-1.20	2.68	1.73	0.91	-4.48	-3.52	-1.20	2.68	1.71	0.91
T_{II}^*	(Eq.73) °C	10.70	9.88	9.23	2.15	-0.28	-2.22	15.00	15.00	14.93	10.63	9.00	7.58
T_{II}	(exact) °C	10.88	10.01	9.29	1.79	-0.55	-2.39	15.00	14.87	14.67	10.64	8.87	7.36
c	(error) %	-0.25	-2.54	-1.03	2.68	1.73	0.96	0.00	2.54	4.44	-0.07	0.82	1.25

$$\epsilon = (T_{II} - T_I) / \Delta T_I$$

第3章の計算例で用いた $\Pi = 5$ を得るには上式より $m = 16.7$ 本/hourとなる。したがって燻煙源の間隔を6m、燻煙時間を12時間とすると、1haの農地を第3章で例示しただけ保温するには約3,000本程度のタイヤの燃焼を必要とすることがわかる。この値は現実的ではなく、煙粒子の放射特性の改善、煙粒子の濃度分布の制御および大量の煙粒子を効率良く発生させる装置の開発などが必要である。

(b) 図による温度の推定例

煙粒子の濃度が既知であるとして光学距離 τ_0 を与えた場合の、図による温度の推定例を表3に示す。ここで、添字Iは数値解析による値、添字IIは図による値であることを示している。なお、 τ_0 が大きく、Bが小さい場合には Φ が1を越えることがあるが、これは主に ϵ_f の値に起因しており、系の簡略化に由来するものである。

5. あとがき

解析を容易にし、現象を明らかとするためいくつかの近似を用いたが、次にのべるいくつかの点が明らかとなったため、燻煙の実際への提言としてまてめておく。

- (1) 燻煙量はある値以下ではほとんど保温効果はなく、また高すぎてもその濃度に比例した効果は期待し得ない。したがって、作物の保温に必要な煙粒子濃度の最低量を推定し、その濃度程度に広域に煙を分配すべきである。また、煙は浮力によらずとも濃度拡散で鉛直

方向へより多く拡散する傾向がある。このため、鉛直方向への不必要な煙の拡散を防ぐことは有利である。

- (2) 煙の散逸を防ぐ意味から、防風柵などの設置が望まれる。
- (3) 日没直後の温度降下は燻煙を施せない場合にはかなり大きいので、燻煙作業は日没直後あるいはそれ以前から始めることが必要である。
- (4) 土壌の含水程度は夜間の地表面温度の変化に大きな影響を与える。したがって、地表面の温度低下を防ぐための土壌を湿められせおくことは有用である。
- (5) 燻煙による保温効率からみると日没時の温度による差異は少ない。しかし、土壌の熱物性値による差異は大きく、その見積りは重要である。
- (6) 濃度場と放射熱伝達場を結ぶ無次元数を導入した。この値が同一であれば系は同一の濃度場—温度場を持ち、燻煙作業中の条件の変化に対処するのに、有用な値となり、また燻煙の効果の理論的、実験的な整理に有用である。
- (7) 燻煙による保温効果を確かなものとするには、煙粒子の放射特性の改善とともに、煙粒子の濃度分布の制御、および大量の煙粒子を効率良く発生させる装置の開発が必要である。

農作物を霜害から守る一つの方法である燻煙について理論的な解析を行ない、検討を行ってきたが、燻煙のもつ熱量を考慮に入れないなど、燻煙の保温効果にとって条件を厳しくとつたにもかかわらず、条件さえ整えれば燻煙による保温効果には捨てがたいものがあることがわかった。本研究が苦勞の多い寒地農業の一助となれば幸いである。なお、本研究は観点を変えると、放射性流体による熱遮蔽効果として工業的な利用にも適応できることを付記しておく。

本研究を進めるに当って、塩安肥料協会 国分欣一、道立十勝農業試験場 横井義雄、北海道大学 高橋英紀の各氏からご指導および資料の提供を受け、また、農業問題と伝熱の接点を水野玲子氏および本学卒業生 青山英樹、石田博一、小野寺正史、加藤博之の諸兄の調査解析から持ち得た。なお、本研究で必要とした費用の一部は昭和 55 年度北海道科学補助金を用いた。付記し各位に謝意を表す次第である。 (昭和 56 年 5 月 20 日受理)

文 献

- 1) 新編農業気象ハンドブック編集委員会編、新編農業気象ハンドブック、(1977)、510、養賢堂。
- 2) 大後美保編、農林防災(防災科学技術シリーズ9)、(1965)、146、共立出版。
- 3) 公害防止の技術と法規編集委員会編、公害防止の技術と法規(大気編)、(昭53)、136、産業公害防止協会。
- 4) 才木・ほか3名、安全工学、9-2(1970)、102。
- 5) 山本義一、大気輻射学、(1954)、86、岩波書店。
- 6) Pai, S. I., Radiation Gas Dynamics, (1966), 47, Springer-Verlag.