

林野火災の延焼拡大予測に関する基礎的・応用的研究

井上, 章二

<https://doi.org/10.11501/3065600>

出版情報：九州大学, 1992, 博士（農学）, 論文博士
バージョン：
権利関係：

第4節 風下側および風上側燃焼高の特性

風速別の材径と風下側燃焼高との関係を図-2-12に示す。図から明らかなように、風下側燃焼高は風上着火、風下着火いずれの場合も材径の増加にともないほぼ直線的な増加傾向を示しているが、風速の変化に対する変動は小さい。したがって、材の風下側で炎が高くなるのは、主として、材によって遮蔽されてできる、いわゆる風の影にあたる部分の大きさに起因するものと考えられ、風下側燃焼高は直接風速の大小を表わすというよりも、材径の影響を強く反映する因子といえる。すなわち、材径が大きくなれば、風の影にあたる面積が増加し、炎が高くまで上がるのではないかと考えられる。また、風上着火と風下着火を比較すると風速1m/sのときはほぼ等しいが、風速が増大するほど風下側燃焼高は風上着火の方が大きくなる傾向を示している。

材径別の風速と風上側燃焼高との関係を図-2-13に示しているが、風下側燃焼高の場合とは逆に風上側燃焼高は材径の大小に対してはほとんど変化せず、風速の増大にともなって、直線的な減少傾向を示している。これは風速が大きくなるほど炎が風によって傾き炎が低くなって、風上側の燃焼痕を小さくするためと推察される。したがって、風上側燃焼高は風速の影響を直接表わす因子と考えることができる。また、風上側燃焼高は風上着火と風下着火による相違はほとんど見られない。

以上の結果より、風速および材径両者の変化を表わす因子として、片面燃焼差すなわち〔風下側燃焼高-風上側燃焼高〕が有効ではないかと推察され、これらの因子間の関係を図-2-14に示した。まず、風上着火と風下着火を比較すると上述の結果より当然風上着火の方が片面燃焼差は大きくなっている。これは両者の燃焼動態の相違に起因していると考えられる。すなわち、図-2-15に示すように、

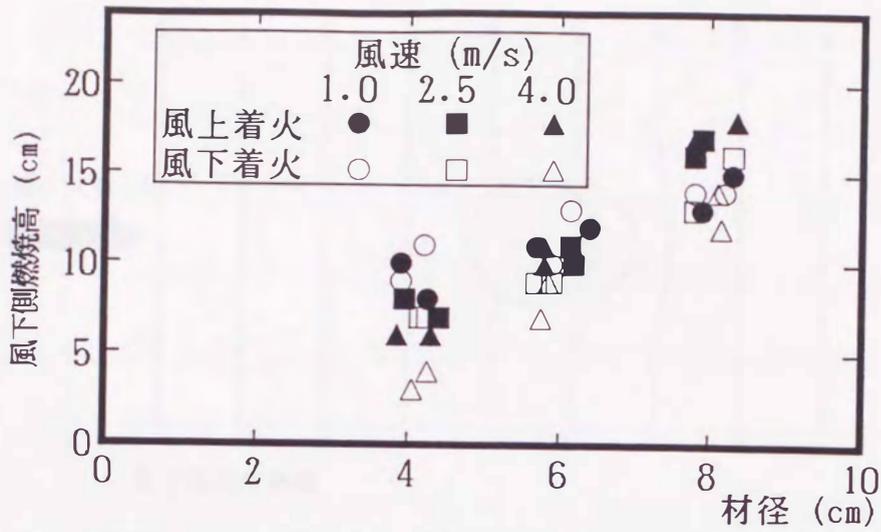


図-2-12 風速別の材径と風下側燃焼高との関係

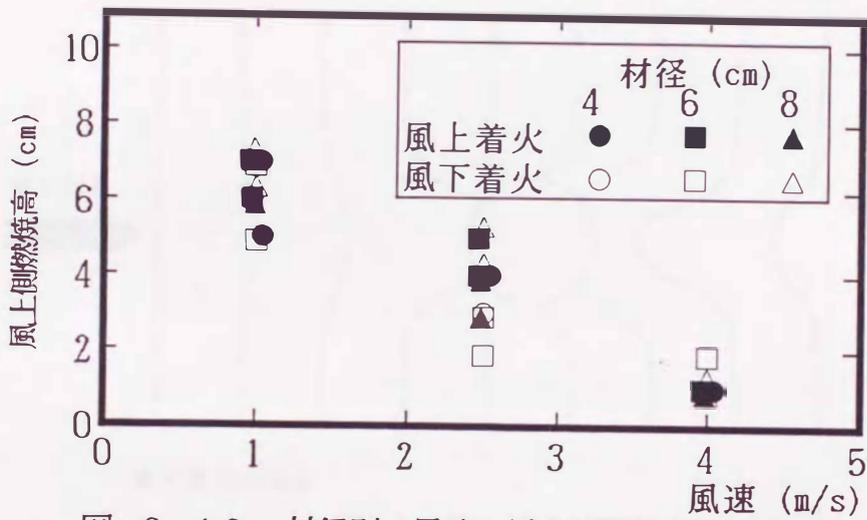


図-2-13 材径別の風速と風上側燃焼高との関係

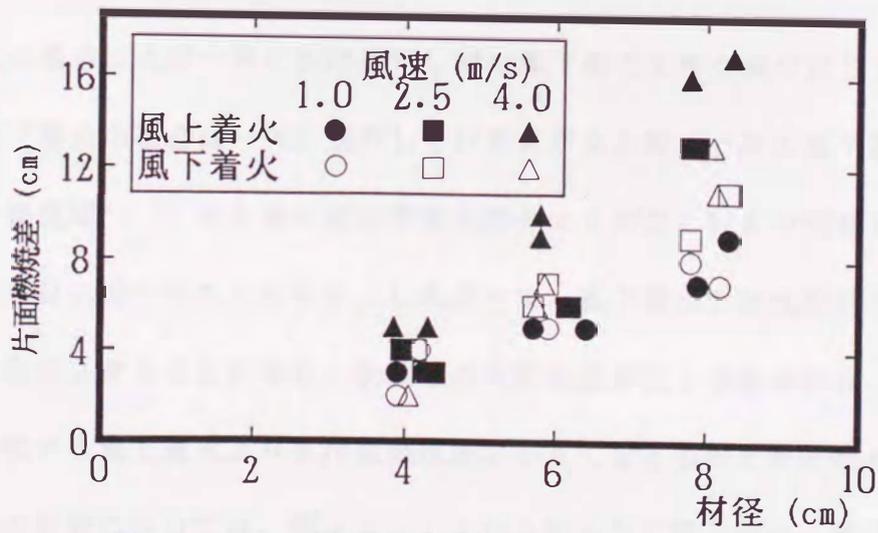
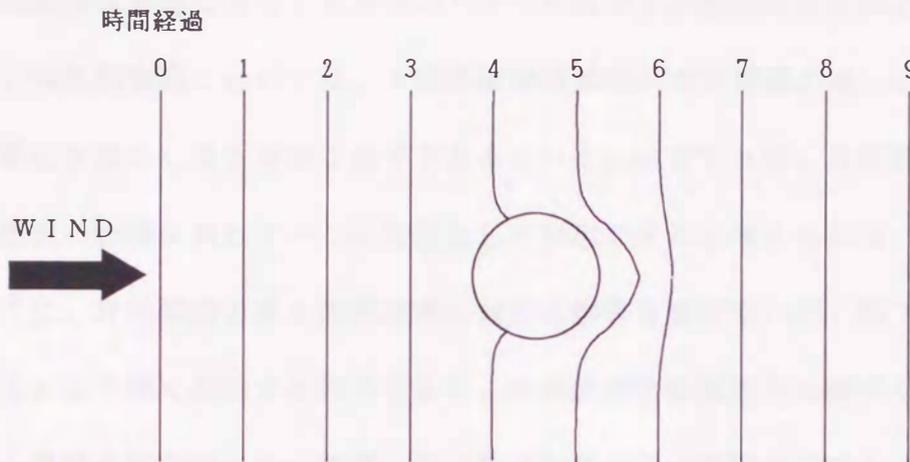
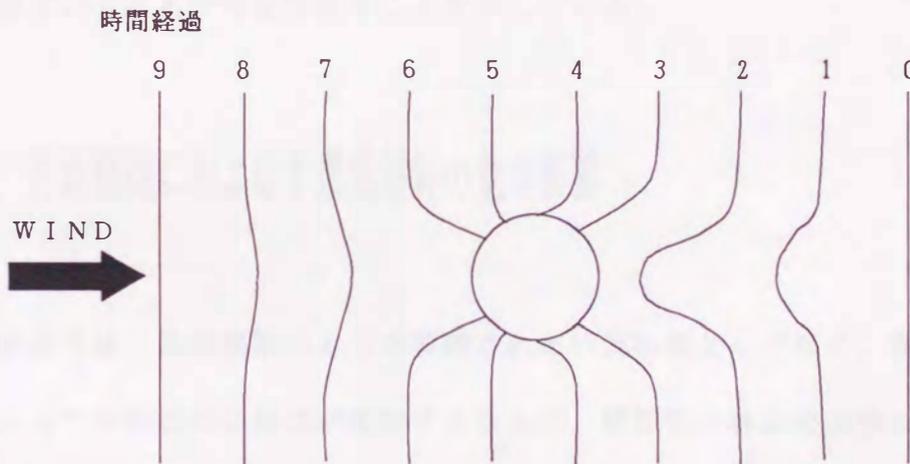


図-2-14 風速別の材径と片面燃焼差との関係



風上着火の場合



風下着火の場合

図-2-15 風上着火と風下着火の延焼前線の相違

風上着火の場合は火が一行に同時進行し材の風下側で大きく炎が立ち上がるのに対して、風下着火の場合は一行に進行していた火がある時点で材の風下側にできた、いわゆる後流域^{22, 66)}のために材の背後の部分の火が先に材まで到達し、遅れて両端部の火が材に達することになる。したがって、風下着火では比較的小さな炎で二度、材を燃焼させることになり、後流域の可燃物量が同じであるから、一度に大きな炎で燃焼する風上着火よりも片面燃焼差が小さくなるものと思われる。次に、風速、材径の影響については、図-2-14から明らかに風上着火、風下着火いずれの場合も材径に対して片面燃焼差がほぼ直線的に増加しており、また、材径別にみ

ても片面燃焼差は風速に対しても多少のバラツキはあるが増加傾向を示している。それゆえ、本風洞実験においては、片面燃焼差は風速および材径の違いに対する片面燃焼の変化を表わし得る有効な因子であるといえ、換言すれば、片面燃焼差の因子は片面燃焼の程度を表わす一つの指標として利用できると考えられる。

このように、片面燃焼の風上側燃焼高は材径の影響を受けないが、風下側燃焼高は材径の大きさを強く反映する因子であり、片面燃焼差は風速との関係が顕著である等、第1章第3節で行った、愛媛・香川県境林野火災の実際の林野火災データにおける数量化解析の結果とほぼ一致しており、この基礎的な風洞実験の結果を現地に対応づけていくことが可能であることを示している。

第5節 片面燃焼におよぼす燃焼材料の量の影響

実際の林地では、風洞実験のような整備された状況はほとんどなく、林床可燃物の多寡によって片面燃焼の指標が変動するならば、燃焼前の林床可燃物の状態を知ることがまず必要となり、風速の推定は非常に困難となる。そこで、風速1 m/s、材径階4 cmと風速4 m/s、材径階8 cmの2種類の条件の実験において、風速1 m/sの実験においては3段階、風速4 m/sの実験においては2段階に燃焼材料の量を変化させて実験を行った。そのときの燃焼材料の量と片面燃焼差との関係を図-2-16に示している。実験データはあまり多くないが片面燃焼差は燃料の量に対してほとんど変化せず、ほぼ一定の値となっている。燃料が増えれば炎が高くなるので、風下側燃焼高および風上側燃焼高各々については当然のことながら大きくなるが、燃料の量による風下側燃焼高、風上側燃焼高の増減量が等しく、片面燃焼差をとれば変化がみられないことになる。したがって、燃焼材料の量が異なる場合でも片面燃焼差によって風速、材径の変化を表わせることになる。このことは、現実の林地のよう

に林床可燃物の量が場所によって違っていても片面燃焼差の因子が片面燃焼を表わす重要な指標になり得ることを示しているといえよう。

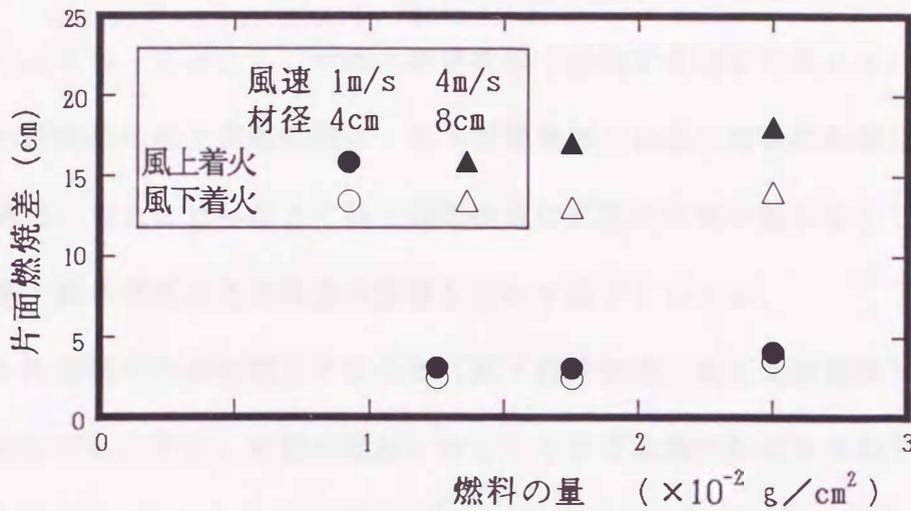


図-2-16 燃料の量と片面燃焼差との関係

第6節 まとめ

本章では、樹木の片面燃焼に関して、風洞を用いた基礎的な燃焼実験を行い、片面燃焼に関する諸量の特性を明らかにした。得られた結果は、次のように要約することができる。

1) 実験には林床可燃物の代用として、中質紙を用い、実験杭にはスギ丸太を使用した。火の進行方向に対して順風の場合と逆風の場合とを想定して、同一条件の実験において、風上側からと風下側からの2種類の着火方法を採用した。その結果、いずれの条件の実験においても、片面燃焼の方向（風上側燃焼高位置から風下側燃焼高位置への方向）は、常に風向と一致しており、片面燃焼は火の進行方向とは無関係で風向によって決定されることが確認された。したがって、現地においても片面燃焼の方向を調べることによって、その木が燃焼したときの風向を容易に知るこ

とができることになる。

2) 片面燃焼の風下側燃焼高は、実験材の材径の増加にともなって直線的に増加するのに対して、風速の変化に対する変動は小さい。すなわち、風下側燃焼高は風速の大小よりも、主として、材径の影響を強く反映する因子であるといえる。

3) 片面燃焼の風上側燃焼高は、風下側燃焼高とは逆に材径の影響はほとんど受けず、風速の増大にともなって風上側燃焼高は直線的な減少傾向を示した。したがって、風上側燃焼高は直接風速の影響を表わす因子といえる。

4) 片面燃焼の片面燃焼差すなわち〔風下側燃焼高－風上側燃焼高〕は、材径の増加に対しても、また、風速の増加に対してもほぼ直線的な増加傾向を示し、材径、風速の両方の影響を表わし得る因子であると考えられた。

5) 片面燃焼差は可燃物の量が変化した場合も、ほぼ一定で変化せず、実際の林地のように燃焼材料の量が場所によって異なる場合でも、風速および直径の影響を表わす片面燃焼の重要な指標になり得ることを示した。

第3章 林野火災における燃焼速度

第1節 林野火災の拡大機構

林野火災における大規模林野火災の重要性については、これまでに述べたとおりであるが、発生した林野火災が大規模化していく原因には、風向・風速、湿度等に代表される気象因子や斜面傾斜、方向等の地形因子、さらには植生の状態ならびに林床可燃物の質や量等の因子を挙げることができる。これらの因子がそれぞれ林野火災の大規模化に対してどのように影響しているのかを検討することは、火災の延焼拡大のメカニズム解明に最終的につながっていくものと考えられる。ところで、林野火災における延焼拡大の原因について、もう少し現実的な立場から考えてみると、一般的に、林野火災が大規模化する場合にはいわゆる飛び火を除けば、降雨等の消火に有利な気象条件あるいは人間の消火活動を上回る火勢であること、様々な消火活動が間に合わないような燃焼速度を有していることなどが想定される。ここで火勢が強いということは、燃焼エネルギーが大きく、消火活動等によっても鎮火せずに燃え広がっていくということである。Fons¹⁴⁾は、火が広がるという現象は、炎の先端付近での着火現象の連続であると説明している。したがって、エネルギーが大きいほど着火が早く起こり、燃焼速度も大きくなることになるので、最終的に火勢の問題も燃焼速度に集約されるのではないかと考えられる。すなわち、風向・風速、地形因子、植生、可燃物等すべてを総合した指標として燃焼速度を位置づけることが可能であり、本章では林野火災の延焼拡大を表わす重要な因子として燃焼速度を取り上げ、検討を行う。

林野火災の燃焼速度を表わすモデルとして、Rothermelの燃焼速度式^{56, 57)}が提案され、現在アメリカ合衆国で実用化段階に入っていると言われている。そこで、こ

のRothermel式がわが国においても適用可能であるか否かについて検討を行うこととした。

第2節 Rothermelの燃焼速度式

I Rothermel式の概要

Rothermelの燃焼速度式は、Fonsの考え方に基づいたFrandsen¹⁵⁾によって提案された次の理論式、

$$R = \frac{I_{xig} + \int_{-\infty}^0 \left(\frac{\partial I_z}{\partial Z} \right)_{z_c} dx}{\rho_{be} Q_{ig}} \quad (3.1)$$

ただし、

R : 準安定状態の火の広がる速度

I_{xig} : 着火のときに燃料に吸収される水平方向の熱の流れ

ρ_{be} : 燃料の有効密度

Q_{ig} : 燃料の単位重量当たりの着火に必要な熱量

$\left(\frac{\partial I_z}{\partial Z} \right)_{z_c}$: 一定深さ、 z_c の可燃物における発熱量の鉛直方向の勾配

を基礎にしている。(3.1)式は、単位面積、単位時間当たりの発熱量を表わしている分子を、着火するために必要な熱量である分母で除して、燃焼速度を算出している。しかしながら、(3.1)式は、分子が熱移動の項となっており、その熱移動の機構が理論的に解明されていない現状では、解析的に解くことはできない。したがって、実際的な解き方をする必要があるので、これを解決したのがRothermelの燃焼速度式である。Rothermel式の概要を図-3-1に示しているが、Rothermel式はFrandsenの理論式同様、エネルギー保存則に基づく熱収支式であり、図中にも示

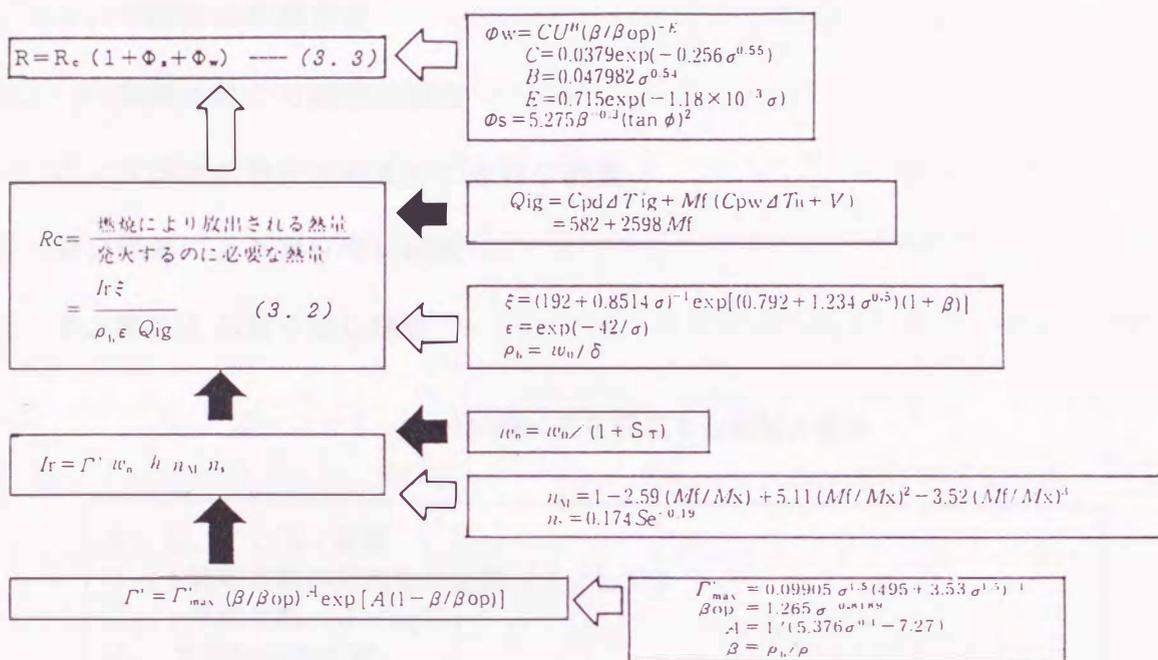


図-3-1 Rothermel 式の概要
(1991, 小林等による)

〔黒矢印：理論式を代入〕
〔白矢印：実験式を代入〕

した (3.2)、(3.3) 式のように表わされる半理論式である。

$$R_c = \frac{\text{燃焼によって放出される熱量}}{\text{発火するのに必要な熱量}} = \frac{I_r \xi}{\rho_b \epsilon Q_{ig}} \quad \text{-----} \quad (3.2)$$

$$R = R_c (1 + \Phi_w + \Phi_s) \quad \text{-----} \quad (3.3)$$

ただし、

R : 燃焼速度

R_c : 平地、無風状態での燃焼速度

I_r : 燃焼によって放出される熱量

ξ : 可燃物の加熱に消費される熱量の割合

ρ_b : 可燃物の堆積密度

ε : 加熱される可燃物の割合

Q_{ig} : 可燃物が発火するまでに必要な熱量

Φ_s : 傾斜による割り増し係数

Φ_w : 風による割り増し係数

表-3-1 Rothermel式を構成する要因の説明

A、B、C、E	: 定数
C_{pd}	: 絶乾状態の可燃物の比熱 (J/kg°C)
C_{pw}	: 水の比熱 (J/kg°C)
M_f	: 可燃物の含水率
M_x	: 限界含水率
I_r	: 燃焼による単位時間あたりの放出熱量 (W/m ² /s)
Q_{ig}	: 単位重量当たりの可燃物が発火するまでに必要な熱量 (J/kg)
R	: 燃焼速度 (m/s)
R_c	: 平地、無風状態での燃焼速度 (m/s)
S_e	: 可燃物中のシリカ以外の無機含有率
S_T	: 可燃物中の無機含有率
U	: 炎の高さ中央部の風速 (m/s)
V	: 水の気化熱 (J/kg)
h	: 可燃物の発熱量 (Kcal/kg)
η_m	: 無機物による熱分解速度減少係数
η_s	: 水分による熱分解速度減少係数
W_n	: 可燃物中の有機物量 (kg/m ²)
W_0	: 単位面積当たりの可燃物量 (kg/m ²)
Γ	: 理想熱分解速度 (絶乾状態の α -セルロースの熱分解速度) (S ⁻¹)
Γ_{max}	: 最大理想熱分解速度 (S ⁻¹)
ΔT_{ig}	: 絶乾状態の可燃物が発火するまでに上昇する温度 (°C)
ΔT_B	: 可燃物中の水分が蒸発するまでに上昇する温度 (°C)
Φ_s	: 傾斜による割り増し係数
Φ_w	: 風による割り増し係数
β	: 可燃物の堆積密度 (kg/m ³)
β_{OP}	: 熱分解速度が最大になるときの β (kg/m ³)
δ	: 可燃物の堆積深 (m)
ε	: 炎によって加熱される可燃物の割合
ξ	: 可燃物の加熱に消費される放出熱量の割合
ρ	: 可燃物の真の密度 (kg/m ³)
ρ_b	: 可燃物の堆積密度 (kg/m ³)
σ	: 可燃物の表面積-体積比
ϕ	: 傾斜角度 (°)

式中のパラメータのうち、直接測定することができないものは実験的に近似値を与えている。なお、図-3-1に示されている各式で使用されている記号、パラメータの意味は表-3-1に一覧表として掲載した。

(3.2)式は平地で、無風状態のときに適用できるもので、傾斜地や風がある場合は、(3.3)式のように、傾斜や風に対する補正を行って燃焼速度を算出している。したがって、このRothermel式は平地、無風状態が基本であり、傾斜地の場合は、火が斜面下部から上部へ燃え上がる時、また風がある場合は、火の進行方向に対して順風の場合にのみ適用できるものである。Rothermel式の基本パラメータは11個で、その他はこれら11個のパラメータから計算することができる。

II 燃焼速度に関与する因子の影響度

Rothermel式は図-3-1に示したようになりに複雑であり、この中に含まれるパラメータや物理因子等がRothermel式において、すなわち燃焼速度に対してどのような影響力を有しているのか式形だけではほとんど判断することはできない。そこで、この中で基本となるパラメータ11個について、それらを一つずつ抽出し、他のパラメータ値はそのまま林野火災における標準的な値に固定し、その因子の値のみを変化させて、燃焼速度の変化特性を調べる数値シミュレーションを行った。この解析で用いた各パラメータの標準値を表-3-2に、また、シミュレーションの結果を図-3-2～図-3-12に示している。

まず、可燃物の表面積と体積の比、 σ は落葉等の天然材料の一般的数値は40～140 (1/cm)と考えられる。その範囲では、図-3-2から明らかなように燃焼速度は直線的に増加してはいるものの、その傾きはあまり大きくなく0.56～0.98 (cm/s)と変化量も小さいため σ は燃焼速度の決定的要因ではないと考えられる。図-3-3は単位面積当たりの可燃物量、 W_0 が増加すれば燃焼速度が減少することを示している。ただし、 W_0 の変化に対して燃焼速度は変化率はかなり大きいも

のの燃焼速度の絶対値およびその変化量は小さく、 W_0 は燃焼速度全体に与える影響は小さいと判断される。図-3-4~図-3-8に示された可燃物の真の密度 ρ_p 、可燃物の含水比 M_r 、これ以上水分が増加すると燃焼しない可燃物の限界含水比 M_x 、可燃物中のシリカ以外の無機含有率 S_o 、可燃物中の無機含有率 S_r と燃焼速度との関係を見ると、 M_x は図-3-1の中に示された式形より明らかに M_r との関連において燃焼速度に大きな影響を及ぼすと考えられ、 M_x 単独ではほとんど燃焼速度は変化しない。その他の因子については、それぞれに燃焼速度は特有の変化形態を示しているが、変化量も小さく速度そのものも大きくないのでこれらの因子は単独では燃焼速度を支配する要因とはならないであろう。また、可燃物の発熱量 h は実際には測定に手間のかかるものであり、現実の林地のように多様な可燃物の集合体であれば正確な値を得ることは困難である。図-3-9からわかるように h の取り得る範囲での燃焼速度の変化は小さく、その地域の代表的な可燃物の h の値を用いても大きな影響はないように思われる。

可燃物の深さ、 δ と燃焼速度との関係を図-3-10に示しているが、 δ の取り得る範囲は現実の山林地、原野では幅が広く、植生の状態によって大きく異なる。落葉落枝のみの場合を想定すると0~20cm程度、草丈の高い下層植生を想定した場合には、0~200cm程度の範囲であろう。図-3-10によれば、 $\delta=20$ cmで燃焼速度は5.87cm/sとそれほど大きくはないが、 $\delta=200$ cmになると燃焼速度は35.8cm/sとなり、その他の因子と比較して燃焼速度に与える影響は大きくなる。図-3-11は斜面傾斜 ϕ と燃焼速度との関係を表わしている。傾斜0~50°の変化に対して、燃焼速度は0.8~15.5m/sとなっており、 δ と同程度の影響力を有しているといえる。風速 U と燃焼速度との関係を示すと図-3-12のようである。これによると風速の取り得る値に対する燃焼速度は他のパラメータとは比較にならないほど大きく、燃焼速度に及ぼす影響力が大であることをものごとっている。風速12m/sのときに、燃焼速度は約195cm/sにもなり δ に対して1

オーダー、他の因子に対しては2~3オーダー大きいことになる。

表-3-2 シミュレーションに用いた Rothermel式のパラメータ値

パラメータ記号・単位	パラメータ値
σ (cm^{-1})	100.0
ρ_p (g/cm^3)	0.26
W_0 (g/cm^2)	0.04
δ (cm)	4.0
M_f	0.0
M_x	0.3
S_e	0.01
S_T	0.03
h (cal/g)	5000.0
U (m/s)	0.0
ϕ ($^\circ$)	0.0

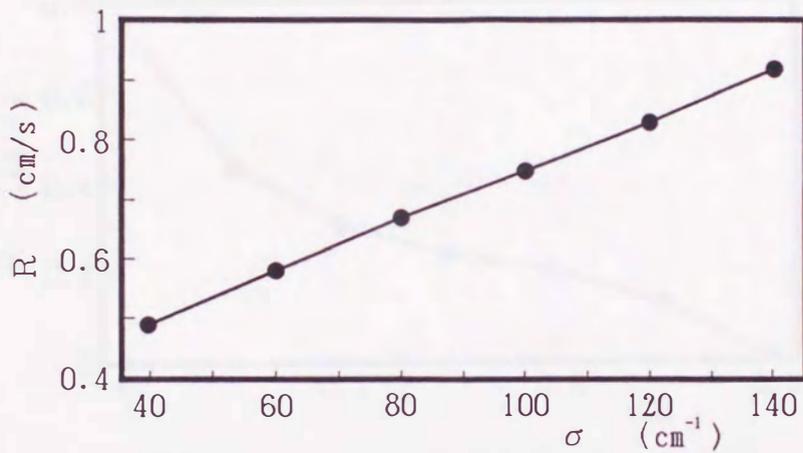


図-3-2 σ と燃焼速度 (R) との関係

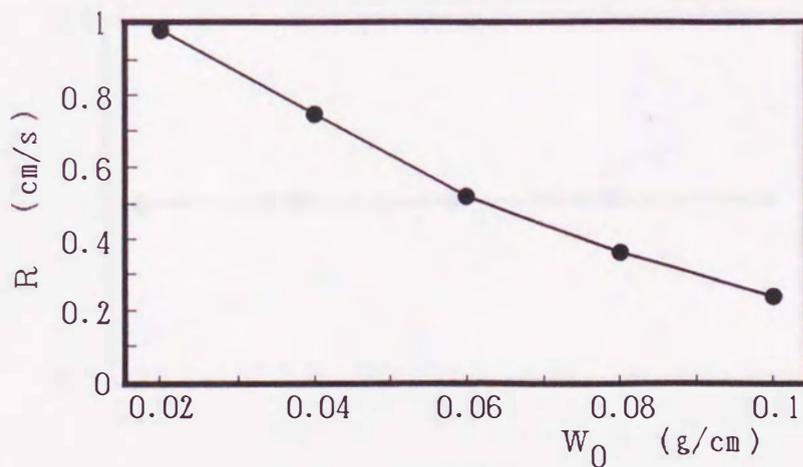


図-3-3 W_0 と燃焼速度 (R) との関係

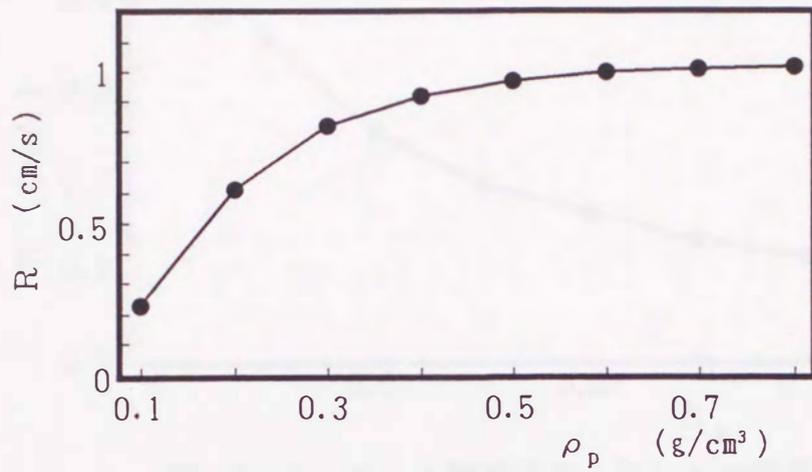


図-3-4 ρ_p と燃焼速度 (R) との関係

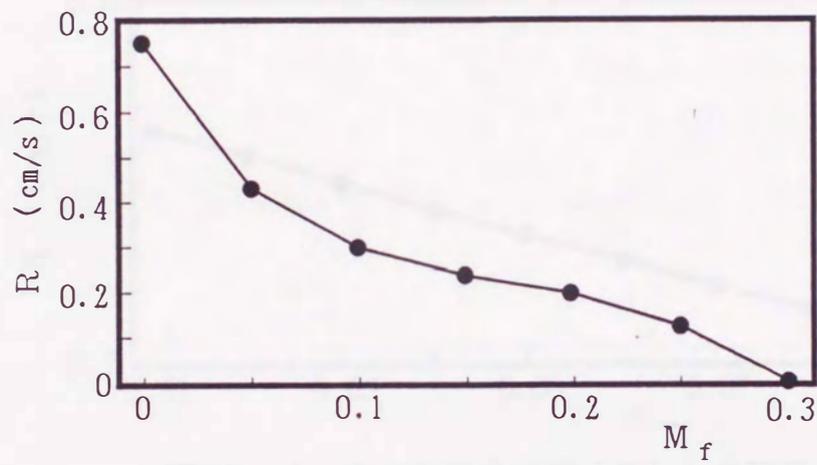


図-3-5 M_f と燃焼速度 (R) との関係

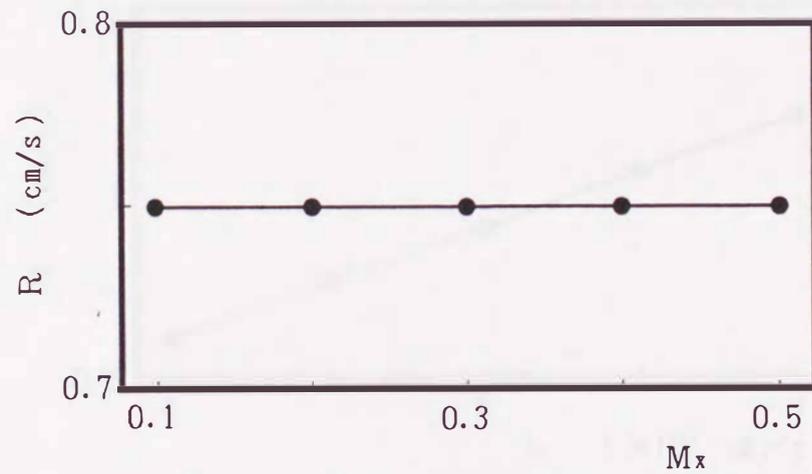


図-3-6 M_x と燃焼速度 (R) との関係

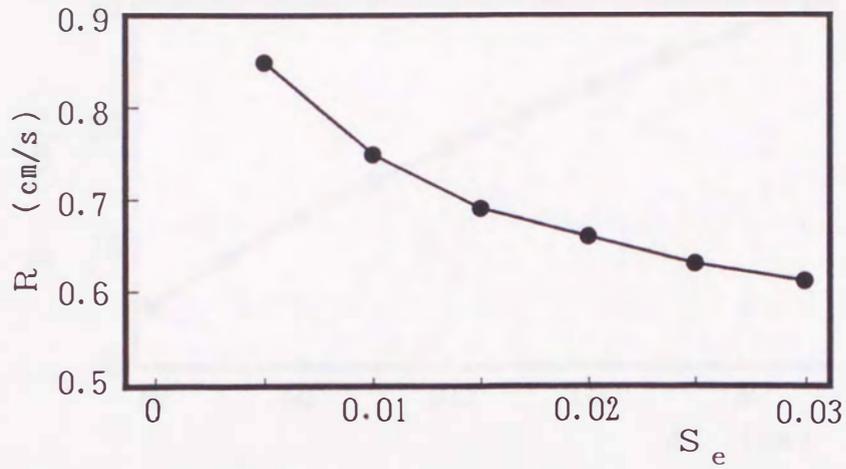


図-3-7 S_e と燃焼速度 (R) との関係

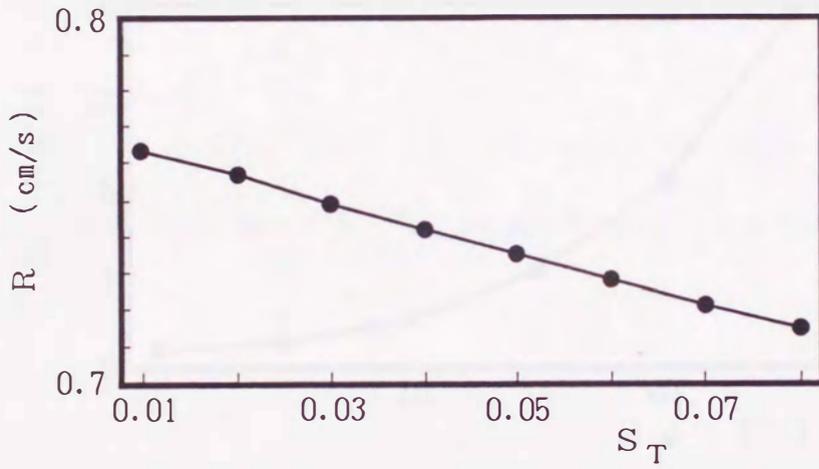


図-3-8 S_T と燃焼速度 (R) との関係

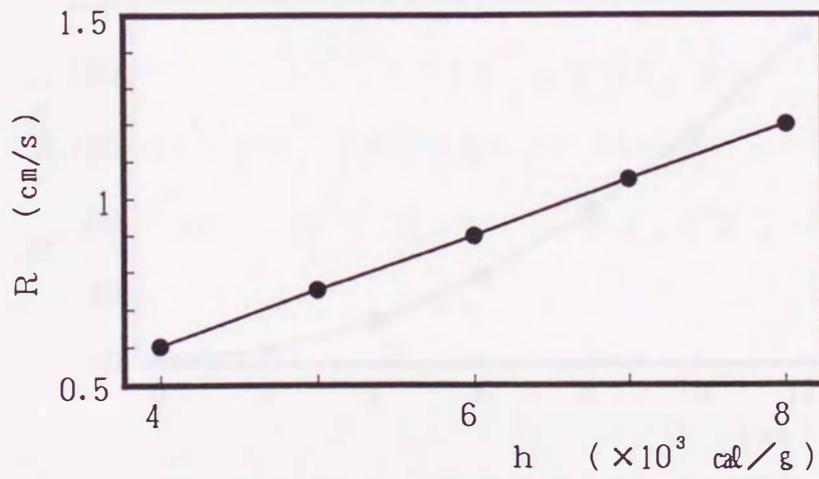


図-3-9 h と燃焼速度 (R) との関係

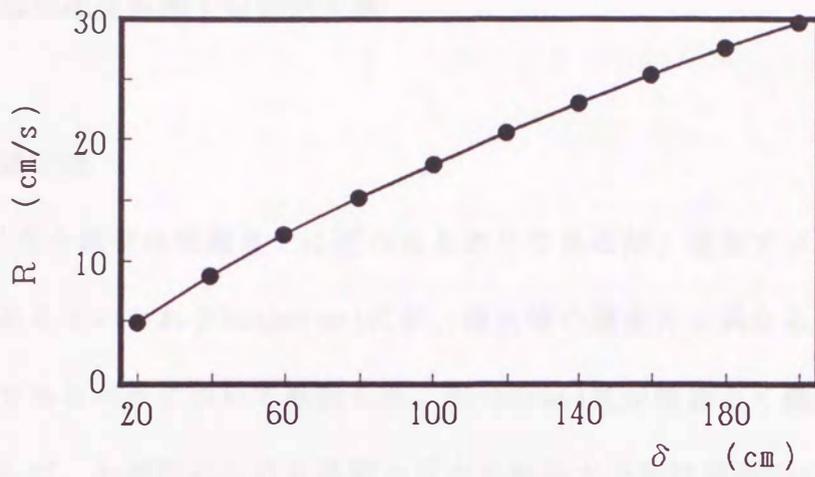


図-3-10 δ と燃焼速度 (R) との関係

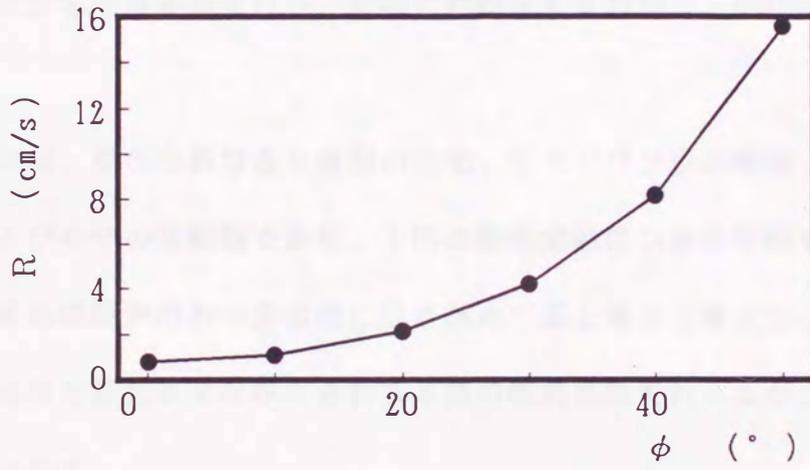


図-3-11 ϕ と燃焼速度 (R) との関係

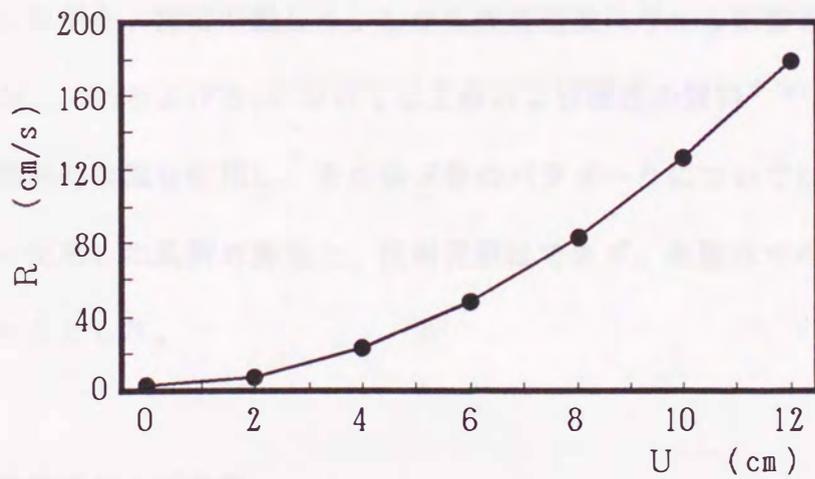


図-3-12 U と燃焼速度 (R) との関係

第3節 燃焼速度に関する風洞実験

I 実験方法

Rothermel式の概要は前節までに述べたとおりであるが、現在アメリカ合衆国で実用化段階にあるといわれるRothermel式が、植生等の諸条件の異なるわが国でどの程度適用可能であるのかについて検討した。Rothermel式が精度よく燃焼速度を算出可能であるならば、わが国における林野火災の延焼拡大予測は飛躍的に進展するものと思われる。そこで第2章での実験に用いた風洞を利用して、燃焼材料やパラメータ値を変えながら燃焼実験を行い、実際に燃焼速度を計測し、Rothermel式との比較を行った。

燃焼材料は幅、厚さの異なる2種類の木毛、モミジバフウの落葉、中質紙、クヌギの落葉およびササの6種類であり、1回の燃焼実験につき各材料を100g使用し、それを風洞燃焼炉内の一定面積に敷き詰めて風上側より着火し、燃焼速度を計測した。風速等を変化させながら合計38回の燃焼実験を行ったが、実験の諸元を表-3-3に示す。

また、Rothermel式の計算に必要なパラメータ値は、前節のシミュレーションの結果も参考にしながら、測定が難しく、しかも燃焼速度に与える影響がそれほど大きくない h 、 M_x 、 S_o および S_T については文献および既往の資料^{5, 37, 42)}より実験材料に応じた標準的な値を使用し、その他 δ 等のパラメータについては実測した。さらに、実験に使用した風洞の構造上、傾斜実験はできず、実験はすべて水平で行ったので、 $\phi = 0$ とした。

II 実験結果および考察

各実験における実測燃焼速度 ($R_{o,b}$) とRothermel式による計算燃焼速度 (R_c)

等の実験結果を表-3-4に示しており、それを図示したものが図-3-13である。図中に示した1:1の直線よりも上方にある、すなわち過大な計算値を与えているプロットが多い。そのようなプロットの内、風速が2 m/s以上のものについて風速値を図中に記しているが、風速が大きい場合に1:1の直線から遠く離れていく傾向を示している。そこで、燃焼材料別に風速と燃焼速度との関係を図示すると、図-3-14のようになる。これは木毛、モミジバフウ、中質紙について示しているが、いずれも風速が小さいときは実測値と計算値はよく一致しているが、風速が大きくなるにしたがって計算値が実測値を大きく上回るようになる。特に、中質紙の燃焼実験において

風速が8 m/sのときは

実測値の平均が約2

0 cm/sであるのに対

し、計算値は128

cm/sとなり実測値の

6.4倍もある。

一方、本研究の風洞実験において、条

件を設定することが

できなかった傾斜φ

については、小林等

³⁷⁾によって燃焼速度

との関係がある程度

実験的に明らかにさ

れている。これによ

ると、燃焼材料とし

表-3-3 実験の諸元

No.	燃焼材料	風速(m/s)	No.	燃焼材料	風速(m/s)
1	木毛(細)	0.0	20	中質紙	2.0
2	"	0.0	21	"	2.0
3	"	1.0	22	"	2.0
4	"	2.0	23	"	4.0
5	"	2.0	24	"	4.0
6	"	3.0	25	"	4.0
7	木毛(太)	2.0	26	"	4.0
8	"	2.0	27	"	8.0
9	モミジバフウ	0.0	28	"	8.0
10	"	1.0	29	"	8.0
11	"	2.0	30	"	8.0
12	"	2.0	31	クヌギ	0.0
13	中質紙	0.0	32	"	1.0
14	"	0.0	33	"	2.0
15	"	0.0	34	"	3.0
16	"	0.0	35	ササ	0.0
17	"	2.0	36	"	1.0
18	"	2.0	37	"	2.0
19	"	2.0	38	"	3.0

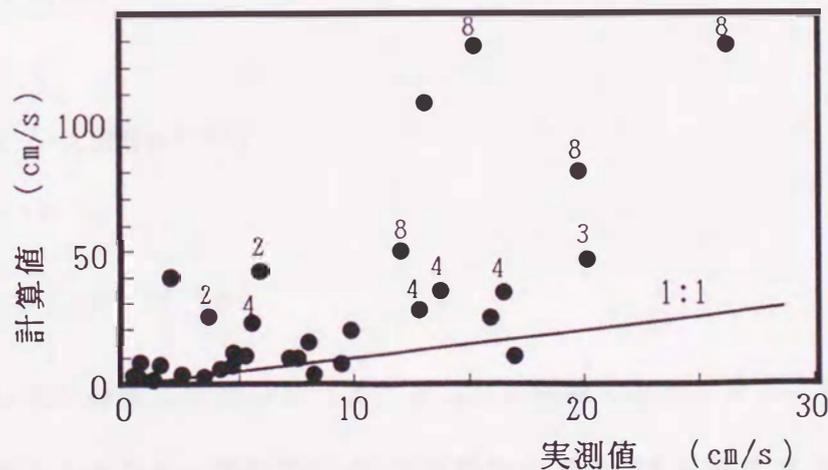


図-3-13 燃焼速度の実測値と計算値
(数値は風速 m/s を示す)

て広葉樹のクヌギ、針葉樹のテーダマツの落葉を用いて、無風、斜面燃え上がりの時の燃焼速度を測定した結果、テーダマツでは燃焼速度の実測値と計算値がほぼ一致し、クヌギでは計算値が実測値よりも大きくなっているものの、可燃物のパラメータ値を吟味することによってRothermel式は適用可能であると結論づけている。したがって、このRothermel式は風速が大きくなると実測値に対して計算値が過大になることが問題であり、この点に焦点を絞って検討することにする。

風速が大きくなればRothermel式は燃焼速度を過大に評価するが、これは第3節で示したようにRothermel式では風速に対して燃焼速度は指数関数的に増加していくのに対し、風洞実験の結果ではほぼ直線的な増加であることによるものと推察される。そこで、Rothermel式の中で風速の因子がどのように扱われているのか検討を加える。Rothermel式の中の風速に関係する部分は、

$$R = R_c (1 + \Phi_w + \Phi_s) \quad \text{-----} \quad (3.3)$$

であり、この(3.3)式以外には風速因子は関与していない。基本となる平地・無風時の燃焼速度に対して、傾斜および風に対する割り増し係数 Φ_s 、 Φ_w によってそれぞれの効果を表わすものであり、風による割り増し係数はRothermel式では次のように与えられている。

$$\Phi_w = C U^B (\beta / \beta_{op})^{-E} \quad \text{-----} \quad (3.4)$$

ただし、

$$C = 0.0379 \exp(-0.256 \sigma^{0.55})$$

$$B = 0.047982 \sigma^{0.54}$$

$$E = 0.715 \exp(-1.18 \times 10^{-3} \sigma)$$

すなわち、風による割り増し係数は風速 U と (β / β_{op}) の関数である。また、係数 C 、 B 、 E は σ の関数であるから、最終的に Φ_w は可燃物の表面積と体積の比 σ の関数でもあることになる。

表-3-4 実験結果

No.	燃焼材料	風速(m/s)	σ (cm ⁻¹)	ρ_b (×10 ⁻³) (g/cm ³)	R _{ob} (cm/s)	R _c (cm/s)
1	木毛(細)	0.0	90.9	5.72	1.17	1.14
2	"	0.0	"	8.89	1.22	0.99
3	"	1.0	"	5.25	9.42	7.97
4	"	2.0	"	7.56	17.00	11.06
5	"	2.0	"	4.25	16.00	24.07
6	"	3.0	"	4.52	20.15	46.85
7	木毛(太)	2.0	75.0	10.10	8.20	3.40
8	"	2.0	"	4.22	7.94	15.81
9	モシハナ	0.0	75.6	7.14	0.54	1.82
10	"	1.0	"	7.14	1.55	7.48
11	"	2.0	"	4.38	5.82	42.30
12	"	2.0	"	6.38	3.61	25.03
13	中質紙	0.0	100.0	13.03	0.51	0.71
14	"	0.0	"	10.90	0.57	0.82
15	"	0.0	"	6.75	0.74	1.06
16	"	0.0	"	6.75	0.74	1.06
17	"	2.0	"	11.15	4.62	6.80
18	"	2.0	"	13.18	4.18	5.69
19	"	2.0	"	6.75	7.54	9.90
20	"	2.0	"	6.75	7.13	9.90
21	"	2.0	"	13.50	3.45	2.75
22	"	2.0	"	9.27	4.72	12.00
23	"	4.0	"	17.25	5.52	22.62
24	"	4.0	"	12.03	12.84	27.27
25	"	4.0	"	6.75	16.52	34.57
26	"	4.0	"	6.75	13.81	34.57
27	"	8.0	"	17.25	12.00	49.86
28	"	8.0	"	12.02	19.80	80.22
29	"	8.0	"	6.75	15.22	128.07
30	"	8.0	"	6.75	26.20	128.07
31	クヌギ	0.0	70.1	7.02	0.61	0.95
32	"	1.0	"	6.72	2.44	3.92
33	"	2.0	"	5.97	5.25	10.98
34	"	3.0	"	5.85	9.89	20.00
35	ササ	0.0	81.5	1.99	0.70	8.28
36	"	1.0	"	2.93	1.94	40.40
37	"	2.0	"	2.88	13.06	106.32
38	"	3.0	"	2.78	19.23	198.16

σ : 可燃物の表面積と体積の比
 ρ_b : 堆積密度
R_{ob} : 燃焼速度実測値
R_c : 燃焼速度計算値

そこで、この風洞実験からこれらの因子と ϕ_w との関係について検討した。まず、各因子と ϕ_w との関係を調べるにあたって、その他の因子の影響を除くために、できるだけ他の因子の条件が等しい場合の実験データを抽出した。図-3-15にその結果を示している。図から明らかなように (β/β_{op}) が増加するにつれて ϕ_w は減少する傾向にあり、しかも、 U および σ についてはそれらが増加するとともに ϕ_w は直線的に増加しており、これら3因子は ϕ_w と密接な関係があるといえる。

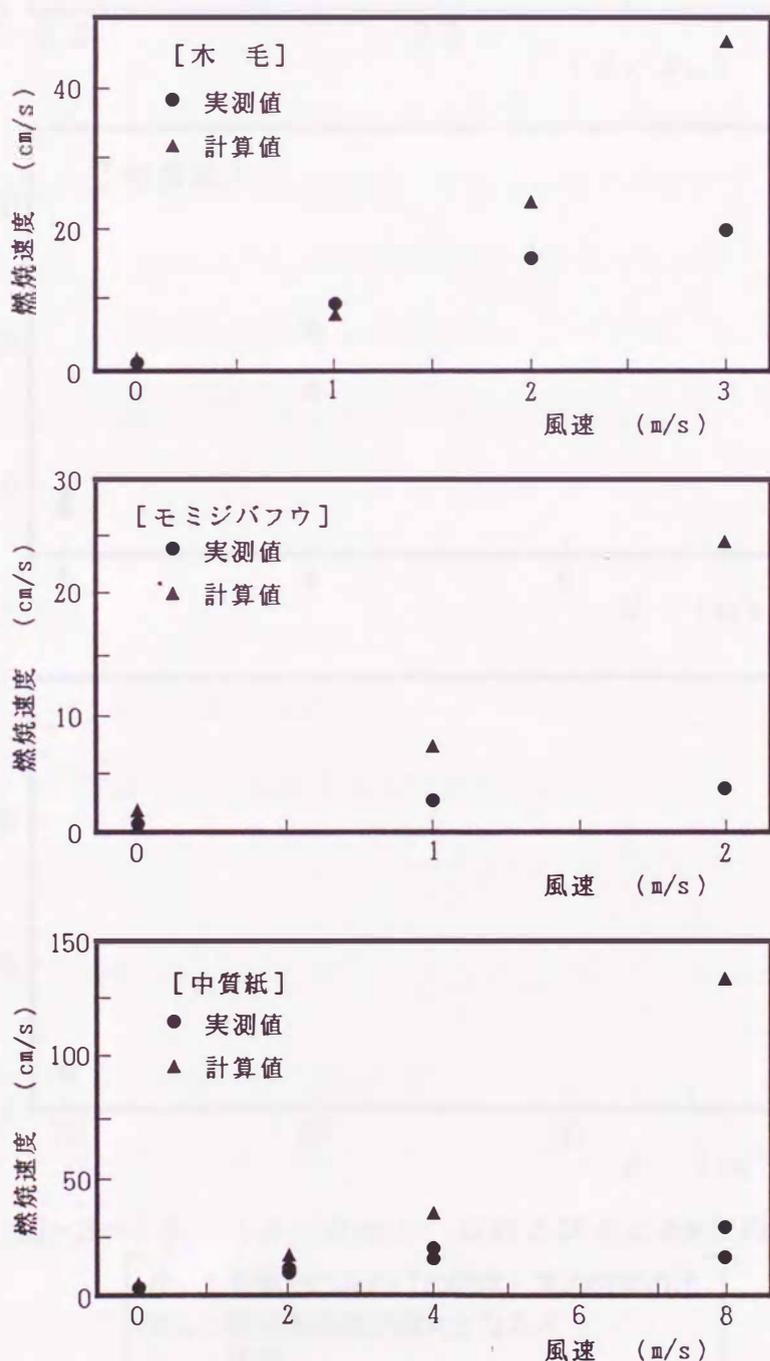


図-3-14 燃料別の風速と燃焼速度との関係

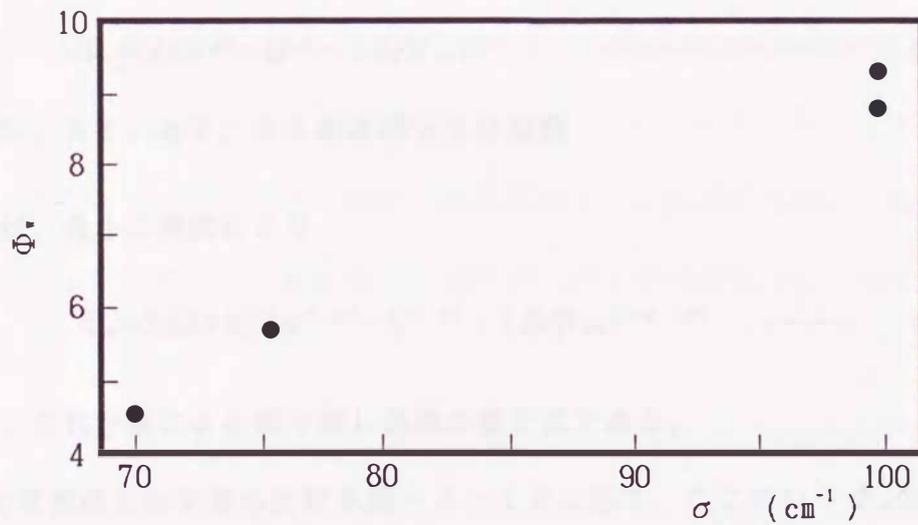
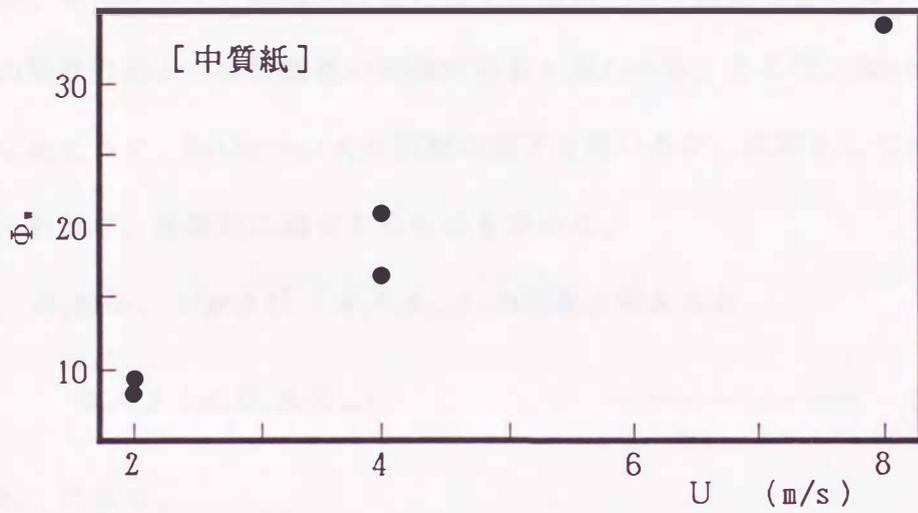
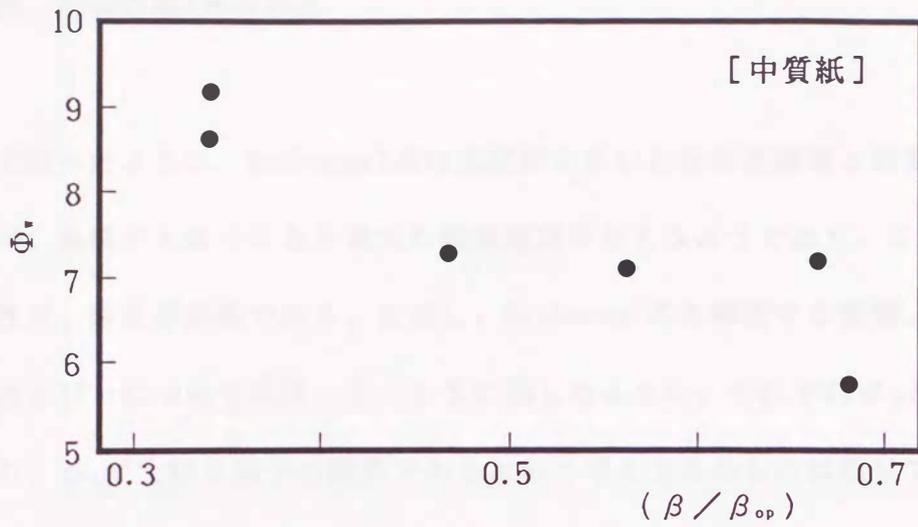


図-3-15 (β / β_{op}) , Uおよび σ と ϕ_w との関係

β : 可燃物のみかけの密度と真の密度の比
 β_{op} : 熱分解速度が最大となる β
 U : 風速
 σ : 可燃物の表面積と体積の比

第4節 Rothermel式の修正

前節で述べたように、Rothermel式は風速が小さいときは実験値と計算値がよく適合するが、風速が大きくなると過大な燃焼速度を与えるようであり、このままでは適用できず、修正が必要である。ただし、Rothermel式を構成する要素、 U 、 (β/β_{op}) および σ については図-3-15に示したように、それぞれ Φ_w と密接に関連しており、 Φ_w が上記3因子の関数であるという考え方そのものは誤りではないと考えられる。したがって、風速が大きいつきに適合しなくなるのは、因子の取り方でなくその関数形あるいは定数値に問題があると思われる。そこで、Rothermel式を修正するにあたって、Rothermel式と同様の因子を用いるが、式形としてはRothermel式にとらわれず、実験的に適合するものを求めた。

まず、 Φ_w は σ 、 U および (β/β_{op}) の関数と考えると

$$\Phi_w = f(\sigma, U, \beta/\beta_{op}) \quad \text{-----} \quad (3.5)$$

と表され、ここで、

$$\Phi_w = A_1 \sigma^{A_2} \cdot U^{A_3} \cdot (\beta/\beta_{op})^{A_4} \quad \text{-----} \quad (3.6)$$

ただし、 A_1 、 A_2 、 A_3 および A_4 は定数

とおけば、最小二乗法により

$$\Phi_w = 7.53 \times 10^{-7} \sigma^{2.29} \cdot U^{1.01} \cdot (\beta/\beta_{op})^{-0.409} \quad \text{-----} \quad (3.7)$$

となり、これが風による割り増し係数の修正式である。

Φ_w の実測値と計算値の比較を図-3-16に示す。ここでいう Φ_w の実測値とは次のことを意味している。(3.3)式において、平地の場合は $\Phi_s = 0$ であるから Φ_w は、

$$\Phi_w = R/R_c - 1 \quad \text{-----} \quad (3.8)$$

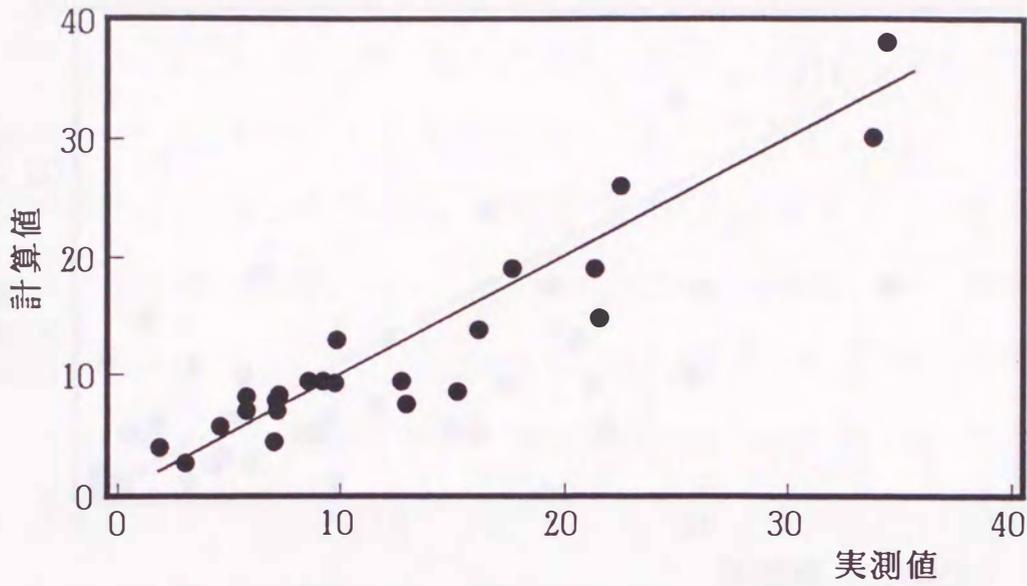


図-3-16 Φ_w の実測値と修正式による計算値

となる。ここで、 R_c は無風時の燃焼速度であり、 R は風があるときの燃焼速度である。したがって、風洞実験においてその他の条件が等しいときの無風と風がある場合の燃焼速度を抽出し、(3.8)式に代入して求められたものが Φ_w の実測値である。図から明らかなように、データは1:1直線近傍にプロットされており、相関係数も0.921と危険率0.1%で有意であった。

そこで、修正されたRothermel式によって再度、風洞実験時の燃焼速度を計算し、燃焼速度の実測値と計算値との関係を図-3-17に示している。1:1の直線に対して、多少バラツキはあるものの、修正前のように風速が大きいときに計算値が異常に過大な値を与えることもなく、初期の目的は達成されているものと判断される。

アメリカ合衆国で実用化段階にあるといわれるRothermelの燃焼速度式が、これほどまでに大きな修正が必要となるのはなぜであろうか。合衆国と日本とでは植生の状態も異なり、その他湿度、気温等の気象条件にも相違はあると思われるが、それだけでこのような結果になるとは考え難い。これはRothermel式の中でも特に修正が必要であった風速因子の取り方に問題がある。Rothermel式の構築段階においては風

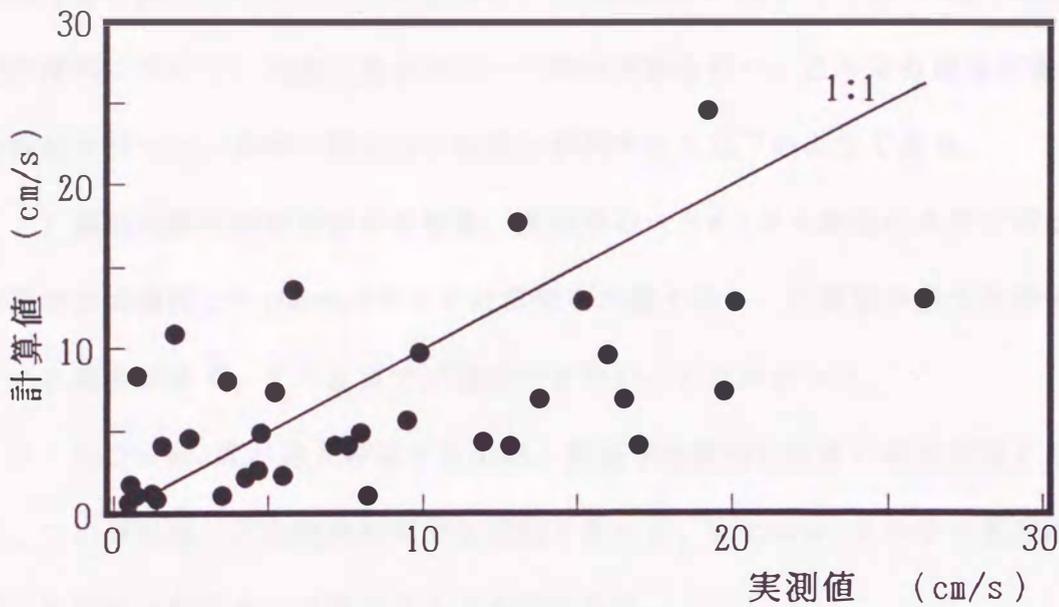


図-3-17 燃烧速度の実測値と修正式による計算値

洞実験も実施しているが実際の林野火災（原野火災）のデータも用いて定数値等を決定している。そのときに、一般に我々が計測している主風向・主風速と実際の燃烧地域内の熱による局地風の風向・風速とに相違があることを考慮していないためと推察される。すなわち、局地風の風速が主風速よりもはるかに大きい時の主風のデータを用いたと推察され、小さな風速値と大きな燃烧速度とを対応づけたのではないかと考えられるのである。福島ら¹⁶⁾は、火災による熱がない場合でも気象官署観測資料と地形等に影響される実際の風（風速）とはかなりの相違があると報告しており、地形だけでなく、さらに熱による変動も大きいと考えられ、燃烧動態の解析ばかりでなく燃烧速度の算出という点からも火災時の現地での風向・風速の推定は非常に重要な課題であるといえよう。

第5節 まとめ

本章では、林野火災の延焼拡大予測を行う場合に、その根幹になると考えられる、

燃焼速度に関し、アメリカで提案され、実用化段階にあるといわれるRothermelの燃焼速度式について、実際に風洞を用いた燃焼実験を行い、日本でも適用可能かどうか検討を行った。本章で得られた結果を要約すると以下のようである。

1) 風洞実験は燃焼材料が6種類、風速が0~8 m/sの6段階の条件で行ったが、実験での実測値とRothermel式での計算値を比較すると、計算値が過大な評価を与えている場合が多く、このままでは適用できないことがわかった。

2) Rothermel式が過大評価するのは、風速が比較的に大きい場合がほとんどであり、この傾向は、どの燃焼材料でも同様であった。Rothermel式の中の風速因子に関連した部分を修正する必要があると判断された。

3) 修正Rothermel式を提案し、風洞実験の結果に適用してみると、風速が大きい場合でも、過大な燃焼速度を算出することもなく、十分に適用可能な範囲まで修正されたことが確認された。

4) 本研究における燃焼速度に関する検討では、いわゆる地表火における林床可燃物の燃焼について考察したが、樹冠火等、燃焼形態の異なる場合の燃焼速度についても検討する必要があるだろう。

第4章 山焼きを利用した現地への応用

第1節 目的

これまでの林野火災の動態解析において必要不可欠の風向・風速データは火災現場から数キロメートルも離れた観測所やアメダスのデータを用いる場合が多く⁵¹⁾、精度的にも、また火災時の熱による局地風の影響が考慮されていない点においても問題が指摘されており、このような解析法には限界がある。したがって、これまでの林野火災の研究進展の支障となっていたのは火災時の現地での風向・風速が不明であったということにあるといえる。そこで、林野火災時における現地での風向・風速を推定するため、火災跡地に残された樹木の片面燃焼に着目し、風洞を用いた基礎的な燃焼実験を行い、風向については片面燃焼の方向から容易に推定可能であることを確認した。また、風速に関しては、実際の火災跡地での樹木の片面燃焼と風速に関する因子について検討を行ったが、風洞実験と実際の林野火災の両者を直接結びつけるには若干無理があるように思える。というのは実際の林野火災跡地ではすべてが自然条件下で起こった火災であり、ある特定の因子の影響についてのみ抽出し詳細な解析を行うことが難しく、さらに、実際の林野火災ではそのときにどのような風が吹いていたのかを特定することが現状では不可能である。以上のような点から、風洞実験の結果を現地へ応用するためには、もう一段階のステップを踏む必要があると判断される。

そこで、現象的には実際の林野火災に近似した現象と考えることができ、しかも燃焼時の必要なデータをある程度取得することが可能で、実際の山林地ほど植生等の諸条件が複雑でなく、若干は実験条件を設定することも可能な、山焼きを利用した現地実験を実施し、基礎的な風洞実験と実際の林野火災との対応を図った。試験

地は山口県秋吉台および福岡県平尾台で、両試験地とも毎年2月末から3月初旬にかけて山焼きを実施するカルスト台地である。

第2節 試験地の概況

図-4-1に示すように、秋吉台は山口県のほぼ中央西よりに位置し、行政的には美東町と秋芳町にまたがっており秋吉台国定公園の中にある。秋吉台試験地は燃焼地域内の一斜面の中部から尾根にかけて設定した。試験地は南向き斜面で、標高は320~360m、勾配はほぼ一様で約15°である。試験地内の植生はササが多く一部に灌木が散在し、試験地より下部の斜面はほとんどがススキである。

平尾台は福岡県北九州市の南端に位置し、北九州国定公園の中にあるカルスト台地である。試験地は一斜面の下部より尾根まで設定した。平尾台試験地は北向き斜面で標高は380~420mと秋吉台試験地と同様であるが、勾配は一様でなく秋吉台と比較して多少複雑な地形である。植生はススキが主で斜面上部にはササも多く、斜面下部には一部にセイタカアワダチソウも存在する。



図-4-1 試験地位置図

第3節 実験方法

試験地内に実験杭として長さ2.0～2.5m、直径10cm前後の皮つきスギ丸太を、ほぼ一定の間隔で立て、試験地が燃焼した後に各実験杭の片面燃焼の風下側燃焼高、風上側燃焼高および片面燃焼方向を測定した。秋吉台では約0.5haの試験地内に37本、平尾台試験地では約1.2haに34本の実験杭を設置した。また多少複雑な地形である平尾台においては、各実験杭の設置位置の最大傾斜方向およびその傾斜角を計測した。風向・風速については試験地周辺の燃焼区域外の2～3カ所で計測を行った(図-4-2、図-4-3参照)。さらに、試験地燃焼中はビデオによる撮影を行ない、後に燃焼動態図を作成した。なお、本実験は秋吉台試験地では1990年3月3日、平尾台試験地では1988年3月10日の山焼きにおいて実施されたものである。なお、山焼き時の連続写真を写真-4-1および写真-4-2に、燃焼後の様子を写真-4-3に示している。

第4節 風向・風速と片面燃焼の測定結果

I 秋吉台試験地

秋吉台においてはAおよびBの2地点で風向・風速の観測を行ったが、その結果を図-4-4に示す。試験地が燃焼している時間の風向は両観測点ともほぼ北風であり、風速は約2m/sである。両観測地点の風向、風速ともに変化傾向は等しくこの結果をこの地域の全体的な主風向、主風速と考えることができる。

秋吉台試験地における実験杭の諸元と燃焼後の片面燃焼の測定結果を表-4-1ならびに図-4-5に示す。

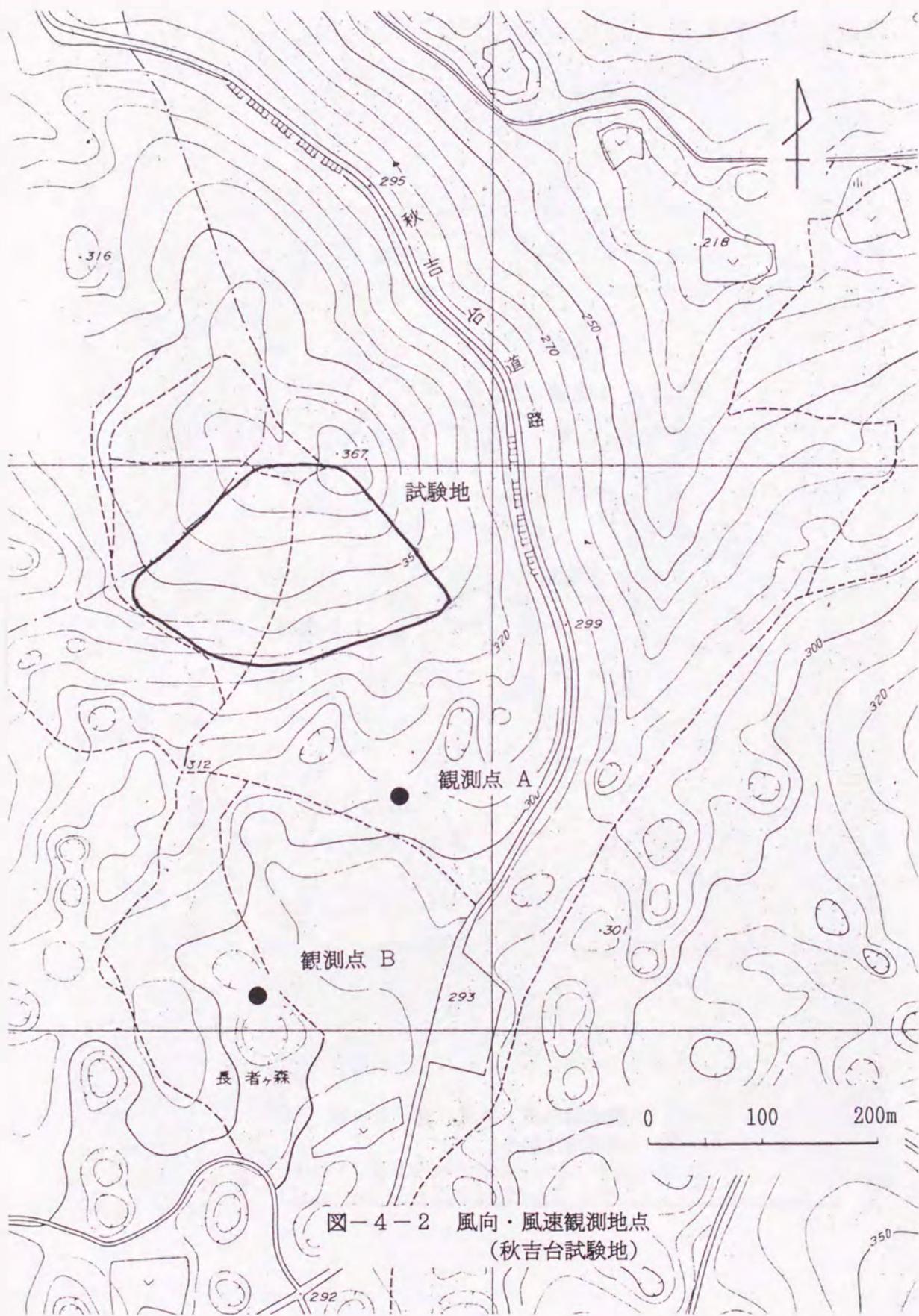


図-4-2 風向・風速観測地点
(秋吉台試験地)



図-4-3 風向・風速観測地点
(平尾台試験地)

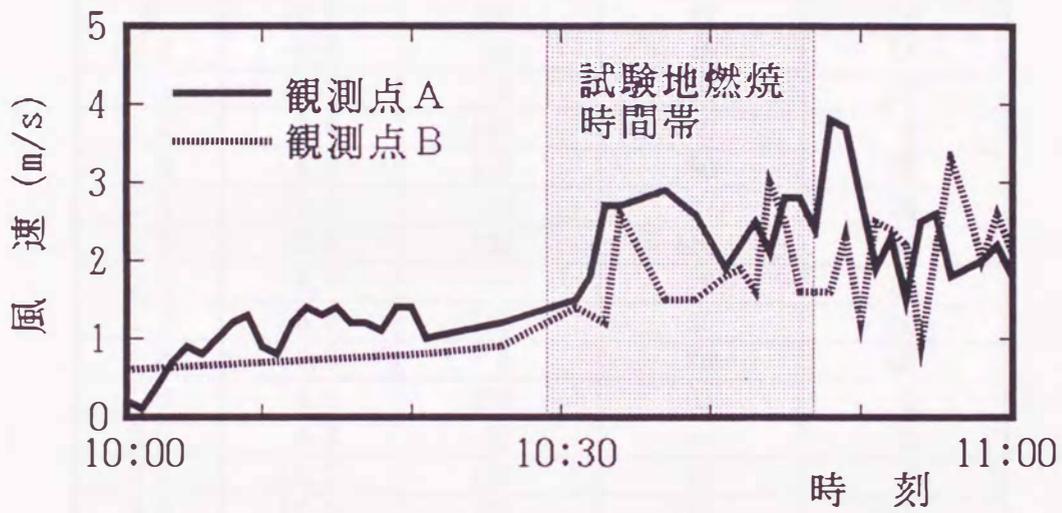
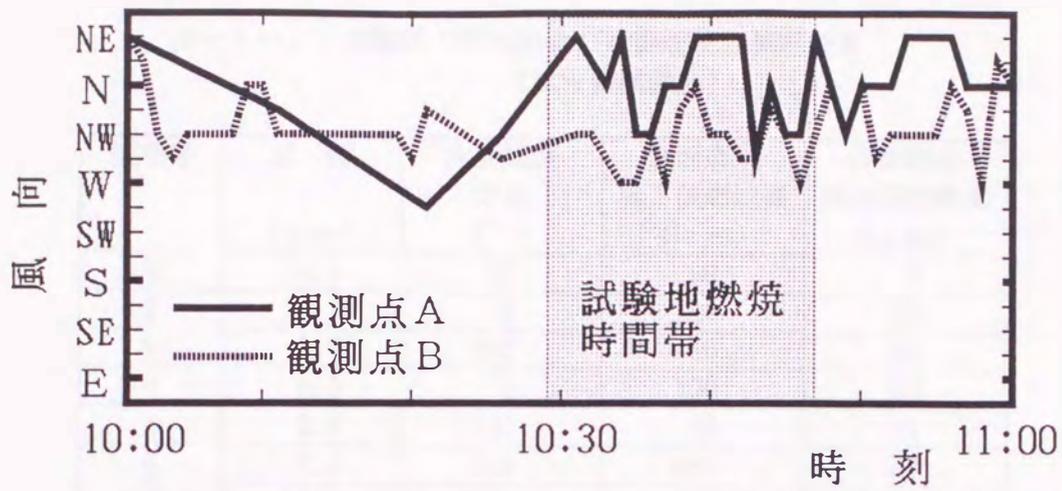
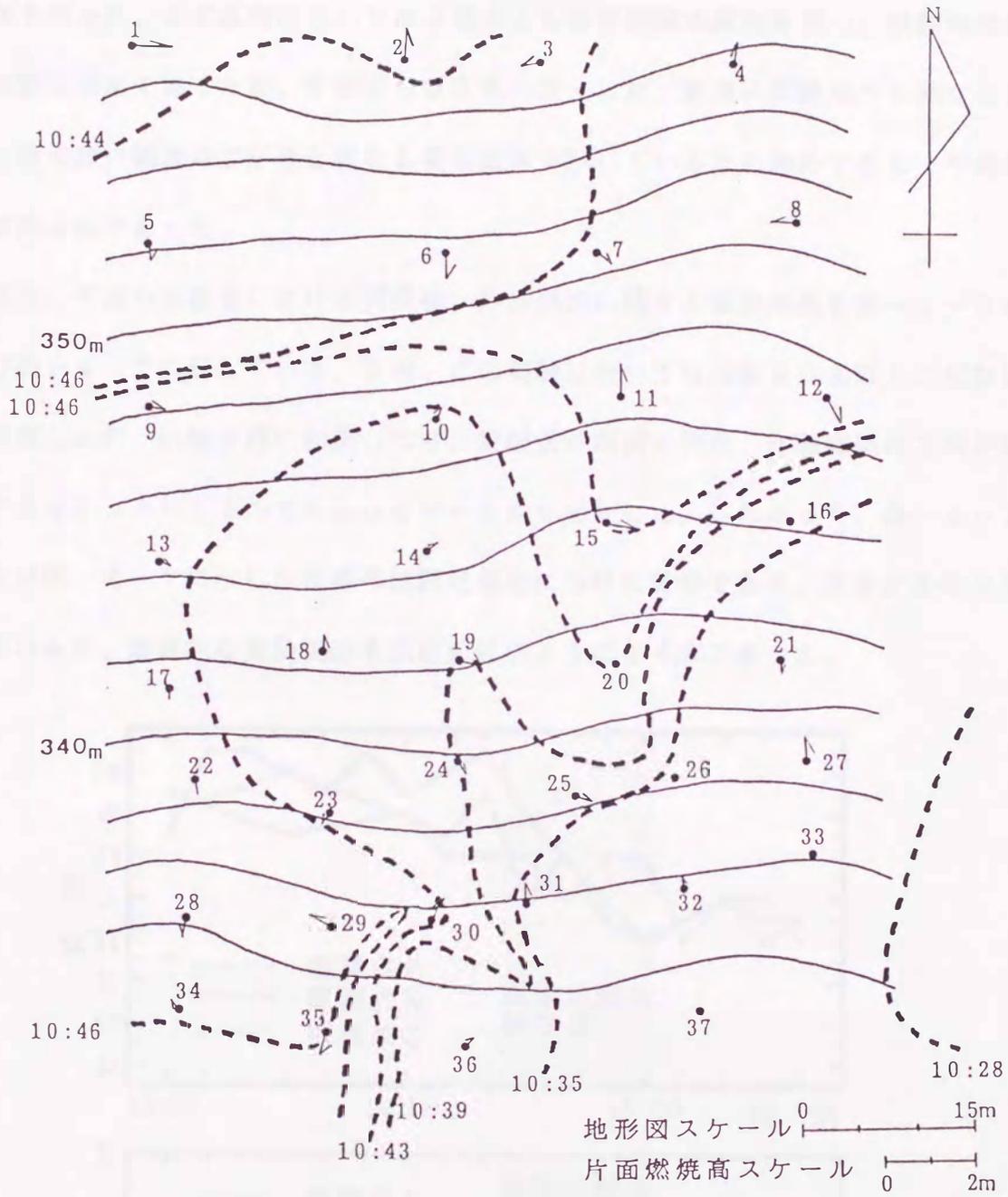


図-4-4 風向・風速の観測結果
(秋吉台試験地)

表-4-1 実験杭の諸元および片面燃焼の測定結果
(秋吉台試験地)

杭番号	直径 (cm)	片面燃焼 方向 (°)	片面燃焼 風下側燃焼高 (cm)	片面燃焼 風上側燃焼高 (cm)
1	10.5	90	90	0
2	10.2	0	120	53
3	8.0	260	80	30
4	9.0	5	100	50
5	8.0	180	80	50
6	7.3	180	150	80
7	11.8	130	50	0
8	12.5	270	55	0
9	10.0	100	40	15
10	9.2	20	40	10
11	11.6	0	104	25
12	9.9	150	0	0
13	9.0	110	50	25
14	10.0	50	67	38
15	12.9	100	110	50
16	8.3	—	20	20
17	9.3	180	50	20
18	10.0	5	76	40
19	14.0	100	33	0
20	8.2	70	—	0
21	11.7	160	25	0
22	12.0	170	103	65
23	9.0	225	46	0
24	11.0	150	67	39
25	11.0	106	64	0
26	9.4	80	90	45
27	11.7	350	95	44
28	9.0	200	48	0
29	10.0	300	128	75
30	12.0	24	118	62
31	12.0	0	138	90
32	12.0	350	25	—
33	8.7	135	75	40
34	11.0	310	106	78
35	10.0	200	84	36
36	10.0	45	50	37
37	10.8	150	—	—



● 杭位置 (数値は杭番号) ➔ 片面燃焼差と方向 - - - 延焼前線

図-4-5 片面燃焼測定結果と燃焼動態
(秋吉台試験地)

II 平尾台試験地

平尾台においては、図-4-6に示すようにA、B、Cの3地点で風向・風速の観測を行った。まず風向については3地点ともほぼ同様の変化を示し、試験地の燃焼初期は西風であったが、中盤からは南風に変化した。風速は試験地から約500mと最も遠い観測点Cが他と異なる変化傾向を示しているため除外すると、平均風速は約3m/sであった。

また、平尾台試験地における実験杭、片面燃焼に関する測定結果を表-4-2および図-4-7に示している。なお、この実験においては当初50本以上の実験杭を設置したが、山焼き前に転倒したり、実験後計測前に倒れ、片面燃焼の方向が計測できなかつたりしたのでそれらをデータから除外した。したがって、表-4-2および図-4-7に示した杭番号は設定当初につけた番号であり、欠番がかなり生じているが、最終的な実験杭の本数は前述のように34本であった。

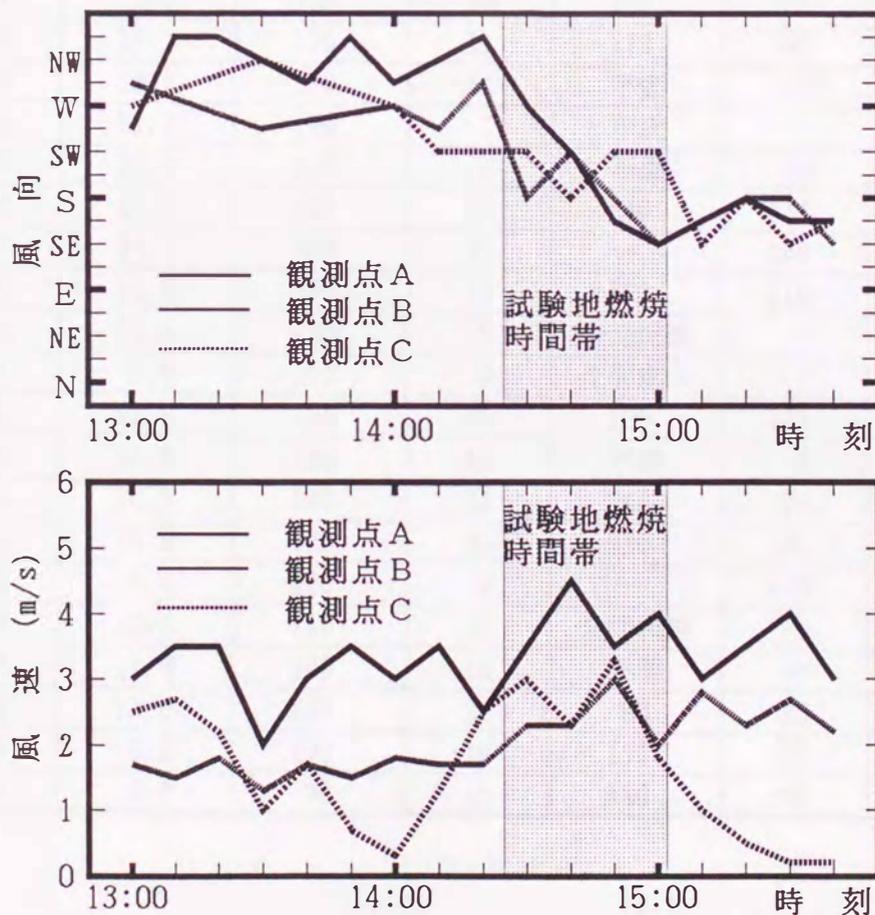


図-4-6 風向・風速の観測結果
(平尾台試験地)

表-4-2 実験杭の諸元および片面燃焼の測定結果
(平尾台試験地)

杭番号	直径 (cm)	最大傾斜 方向 (°)	傾斜角 (°)	片面燃焼 方向 (°)	風下側 燃焼高 (cm)	風上側 燃焼高 (cm)
6	12.7	290	20	不明	—	—
7	14.5	230	13	全面燃焼	—	—
8	13.2	180	17	100	90	35
9	11.3	190	18	280	90	40
10	—	220	16	—	130	130
12	12.5	—	—	不明	—	—
13	13.7	—	—	不明	—	—
14	10.0	170	5	270	27	10
15	13.2	170	22	170	60	20
16	13.5	200	18	150	175	100
17	11.3	210	16	190	20	0
18	11.7	250	18	260	150	100
19	14.0	—	—	全面燃焼	—	—
20	12.3	—	—	不燃	0	0
21	9.2	150	13	160	131	10
22	10.1	170	12	210	160	10
23	13.2	150	14	不燃	0	0
24	11.3	170	7	不燃	0	0
25	13.0	200	13	不燃	0	0
26	10.0	240	35	240	144	60
27	13.3	200	45	—	190	190
28	11.6	190	12	170	210	53
29	12.4	230	26	全面燃焼	—	—
31	8.9	210	4	全面燃焼	—	—
32	12.8	100	15	100	127	0
33	12.5	140	13	不燃	0	0
34	10.5	240	22	240	25	3
35	13.6	220	25	220	30	0
36	12.4	190	0	—	120	120
37	12.4	210	12	全面燃焼	—	—
43	14.0	120	16	不明	—	—
45	13.0	240	22	90	25	0
47	9.3	170	10	170	45	13
51	9.0	90	15	120	135	105

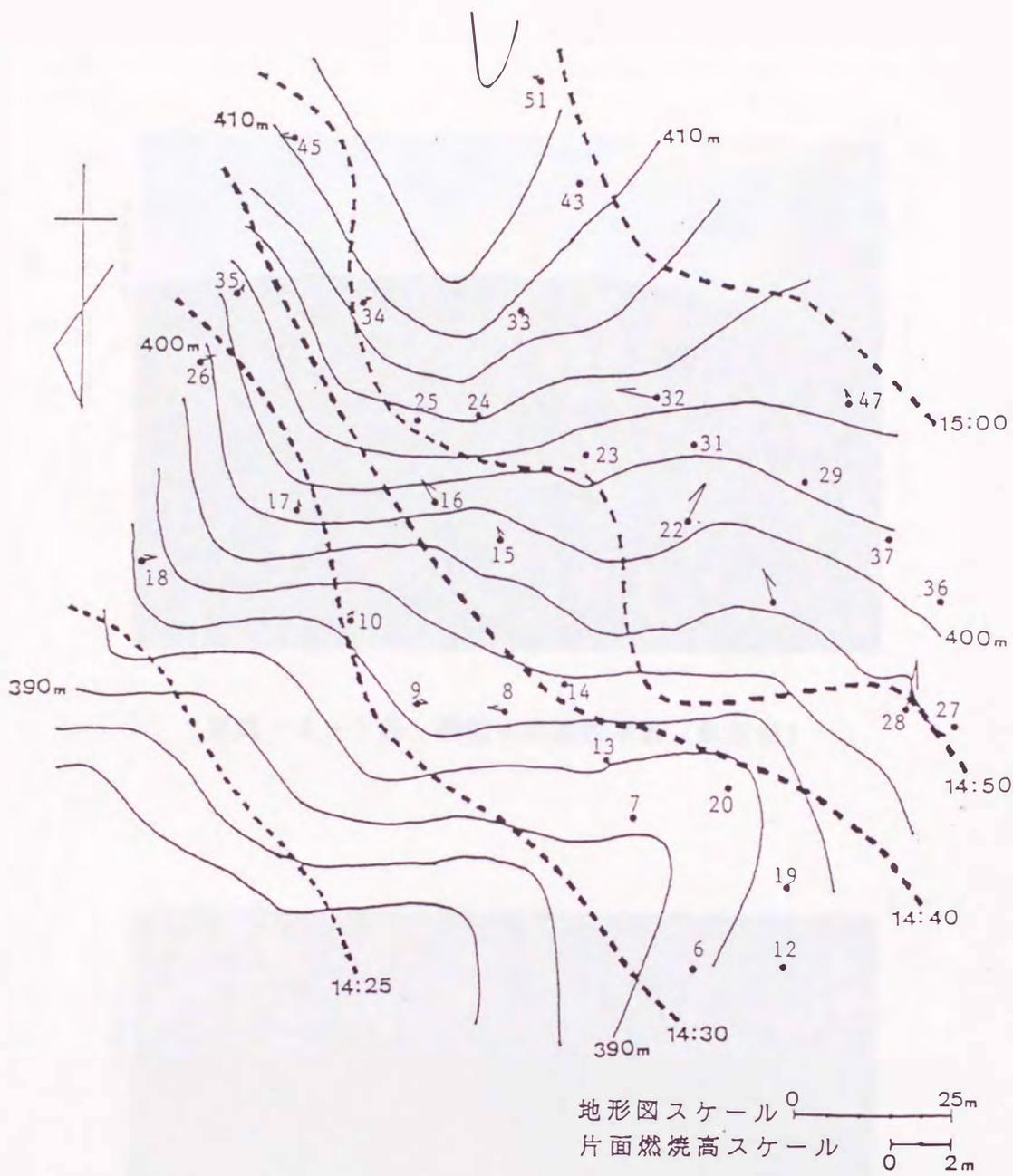


図-4-7 片面燃焼測定結果と燃焼動態
 (平尾台試験地)

- 杭位置 (数値は杭番号)
- 片面燃焼差と方向
- 延焼前線



写真-4-1 ㊶ 燃焼中の連続写真 (秋吉台)



写真-4-1 ㊷ 燃焼中の連続写真 (秋吉台)



写真-4-1 ㉞ 燃焼中の連続写真 (秋吉台)



写真-4-1 ㉟ 燃焼中の連続写真 (秋吉台)



写真-4-1 ㊦ 燃焼中の連続写真 (秋吉台)



写真-4-1 ㊦ 燃焼中の連続写真 (秋吉台)



写真-4-2 ㊶ 燃焼中の連続写真 (平尾台)



写真-4-2 ㊷ 燃焼中の連続写真 (平尾台)



写真-4-2◎ 燃焼中の連続写真（平尾台）



写真-4-2① 燃焼中の連続写真（平尾台）



写真-4-2㊦ 燃焼中の連続写真(平尾台)



写真-4-2㊦ 燃焼中の連続写真(平尾台)



写真-4-3 ㊤ 燃焼後の様子 (秋吉台)



写真-4-3 ㊦ 燃焼後の様子 (秋吉台)

第5節 片面燃焼痕による風速の推定

I 風洞実験と現地のスケール

片面燃焼差の因子が樹木の直径が異なる場合でも風速の変化を表わす重要な因子であることは第2章第4節における風洞実験により明らかとなった。しかも、この因子は林床可燃物の量に変化した場合でもほとんど変動なく、その他の条件が等しければ一定の値をとることが第2章第5節で確認された。したがって、片面燃焼痕から風速を推定する際にもこの片面燃焼差の因子が鍵になると考えられる。しかしながら、風洞という限られた空間における実験であるということを考慮すれば、現地への適用を考える前にそのスケールの問題について考察する必要がある。

本研究で使用した風洞の測定部（燃焼炉）は高さが42cmという制約があり実験材の長さを30cmとした。それゆえ、片面燃焼の重要な指標と考えられた片面燃焼差は風下側燃焼高が30cm、風上側燃焼高が0cmのケースが最大でその値は30cmということになる。第1章第3節で述べたように、実際の林野火災跡地（1985年、愛媛・香川県境林野火災）の調査においては片面燃焼差が30cm以下は図-1-27に示したように全体の10%程度しかなく、30cm～130cmの範囲のものが約60%を占めており、風洞実験の結果をそのまま外挿して風速を推定することは困難である。そこで今回の風洞実験のようなスケールであっても、またこのように全体的にスケールが大きくなっても、同様な現象であるならばある程度共通の指標になると考えられる風下側燃焼高と風上側燃焼高の比（片面燃焼比と呼ぶ）、すなわち〔風下側燃焼高／風上側燃焼高〕について検討した。図-4-8に本実験および愛媛・香川県境林野火災における片面燃焼比の分布を示しているが、多少のバラツキはあるものの全体的に同様の分布となっており、片面燃焼比がスケールが異なる場合も共通の指標たりうることが確認された。ただし、片面燃焼比はあくまで

も相対的な表現のため、この比のみで風速を推定することは不可能であり、スケールの問題を解決するためには、絶対的な意味を持つ片面燃焼差と組み合わせることが必要であると考えられる。この両因子の最適な組み合わせ方については現在のところ理論的な根拠がないため、ある程度試行錯誤的に決定する必要がある。本研究では風速を表わす実験的パラメーターとして両因子の積、すなわち「片面燃焼差×片面燃焼比」について考察した。風洞実験における風速別の材径と「片面燃焼差×片面燃焼比」との関係を図-4-9に、愛媛・香川県境林野火災における「片面燃焼差×片面燃焼比」の分布を図-4-10に示す。図-4-9については、図-2-6と比較して当然、縦軸がスケールアップされているが、風速および材径に対する変化の傾向そのものは不変であり、片面燃焼差同様、「片面燃焼差×片面燃焼比」も片面燃焼を表わす指標となり得ることを示している。

また、「片面燃焼差×片面燃焼比」の値を図-4-10に示された現地の測定結果と比較すると、図-4-9からわかるように、風洞実験での最大値は約300cmであり、現地のデータと比較して若干、値が小さいようであるが、これは、現地のデータは概ね直径が10cm以上の樹木についての調査結果であり、風洞実験における直径が4~8cmと小さいことが原因であると考えられる。しかしながら、現地データにおける300cm以下の占める割合は60%を超えている。したがって、風洞

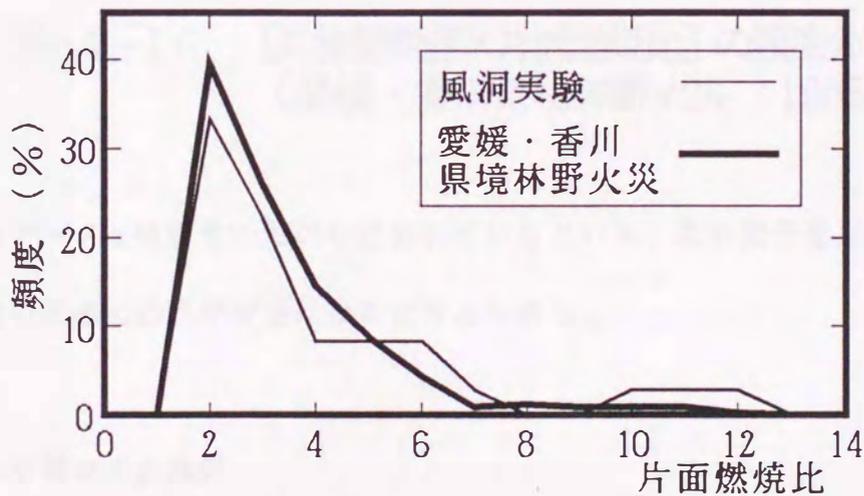


図-4-8 片面燃焼比の頻度分布

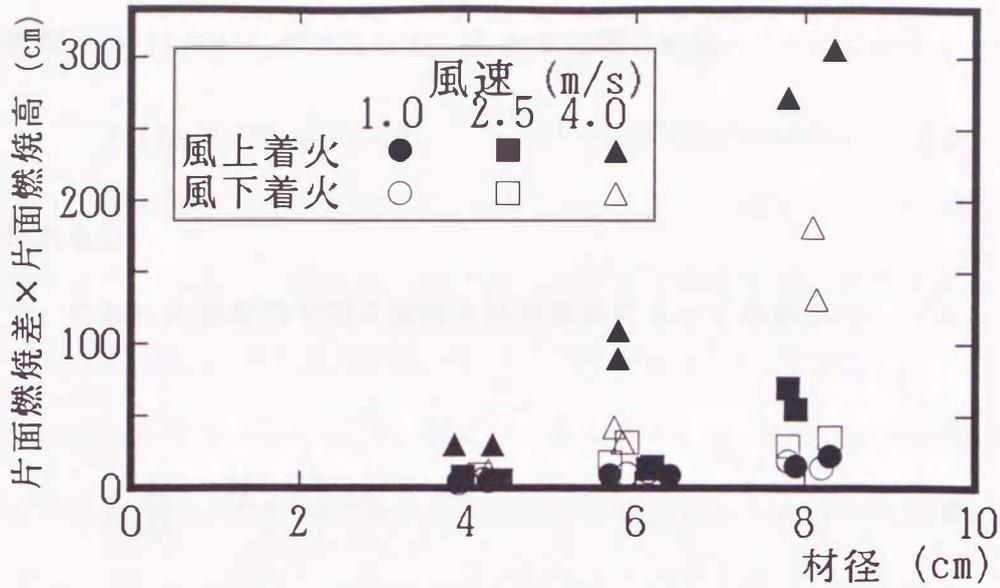


図-4-9 材径と [片面燃烧差 × 片面燃烧比] との関係

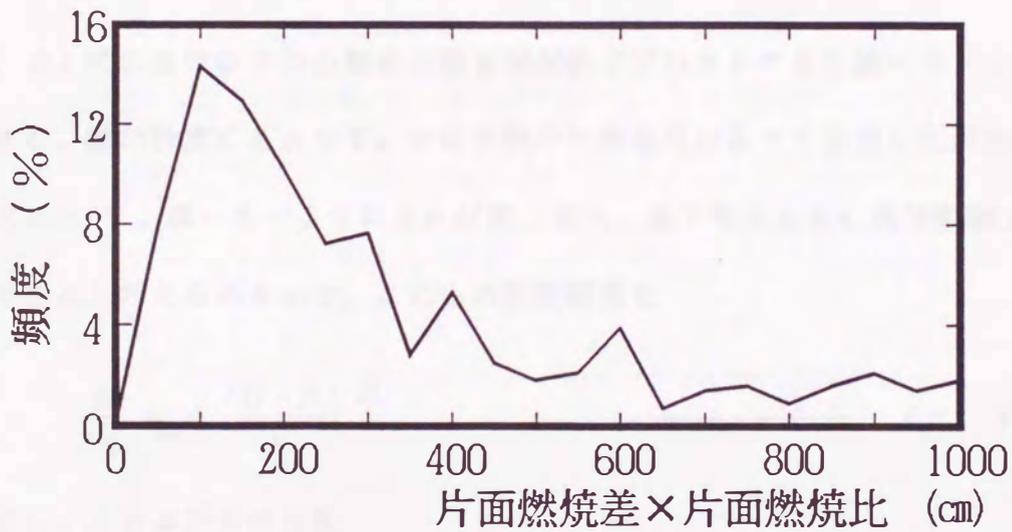


図-4-10 [片面燃烧差 × 片面燃烧比] の頻度分布
(愛媛・香川県境林野火災 1985)

実験と現地データとは値そのものも近似しているといえ、この因子を用いることによって現地の風速の推定が可能になると考えられる。

II 風速推定式の検討

片面燃烧に関与する物理因子としては、[片面燃烧差 × 片面燃烧比] : H (cm)、

樹木の直径：D (cm)、風速：U (cm/s)、空気の粘性係数：μ (g/cm/s) および
空気の密度：ρ (g/cm³) が考えられ、これらの関係式は

$$f(H, D, U, \mu, \rho) = 0 \quad \text{-----} \quad (4. 1)$$

で表わされる。

そこで、これらの物理因子間の関係を次元解析によって求めると、(4. 1) 式
は、

$$f\left(\frac{H}{D}, \frac{U \cdot D}{\nu}\right) = 0 \quad \text{-----} \quad (4. 2)$$

ただし、 $\nu = \mu / \rho$ は空気の動粘性係数 (cm²/s)

となる。

(4. 2) 式における2つの無次元積を両対数でプロットすると図-4-11の
ようである。値の計算にあたって、νは実験中に熱電対によって測定した炉内の温
度より求めた³⁸⁾。図-4-11によれば風上着火、風下着火ともに両対数軸上で直
線近似できると考えられるので、これらの関数関係を

$$\frac{H}{D} = A \left(\frac{U \cdot D}{\nu}\right)^B \quad \text{-----} \quad (4. 3)$$

ただし、AおよびBは定数

とおき、最小二乗法でA、Bを決定した。その結果、(4. 3) 式は、

$$\text{風上着火：} \frac{H}{D} = 1.86 \times 10^{-6} \left(\frac{U \cdot D}{\nu}\right)^{1.64} \quad \text{-----} \quad (4. 4)$$

$$\text{風下着火：} \frac{H}{D} = 7.24 \times 10^{-5} \left(\frac{U \cdot D}{\nu}\right)^{1.20} \quad \text{-----} \quad (4. 5)$$

となり、相関係数は風上着火、風下着火でそれぞれ、0.89、0.87といずれ
も危険率0.1%で有意であった。現地において測定可能なH、Dおよび気温から

求められる ν の値とその樹木が燃焼したときの火の進行方向と風向との関係から
 (4.4)式、または(4.5)式によって現地の火災時の風速が推定できること
 になり、この(4.4)および(4.5)式を風速推定式とした。

(4.3)式において、左辺の (H/D) はレイノルズ数 $(U \cdot D / \nu)$ の関数
 として表されているが、一様な流れの中に円柱がおかれたとき、その背後における
 カルマン渦の発生ならびにその様態はレイノルズ数が大きく関与しており⁶⁷⁾、片面
 燃焼の現象そのものがカルマン渦と関係があるのではないかという指摘⁶³⁾を考慮す
 ると、ここで提案した風速推定式がある程度物理的な意味を持った式と考えられよ
 う。

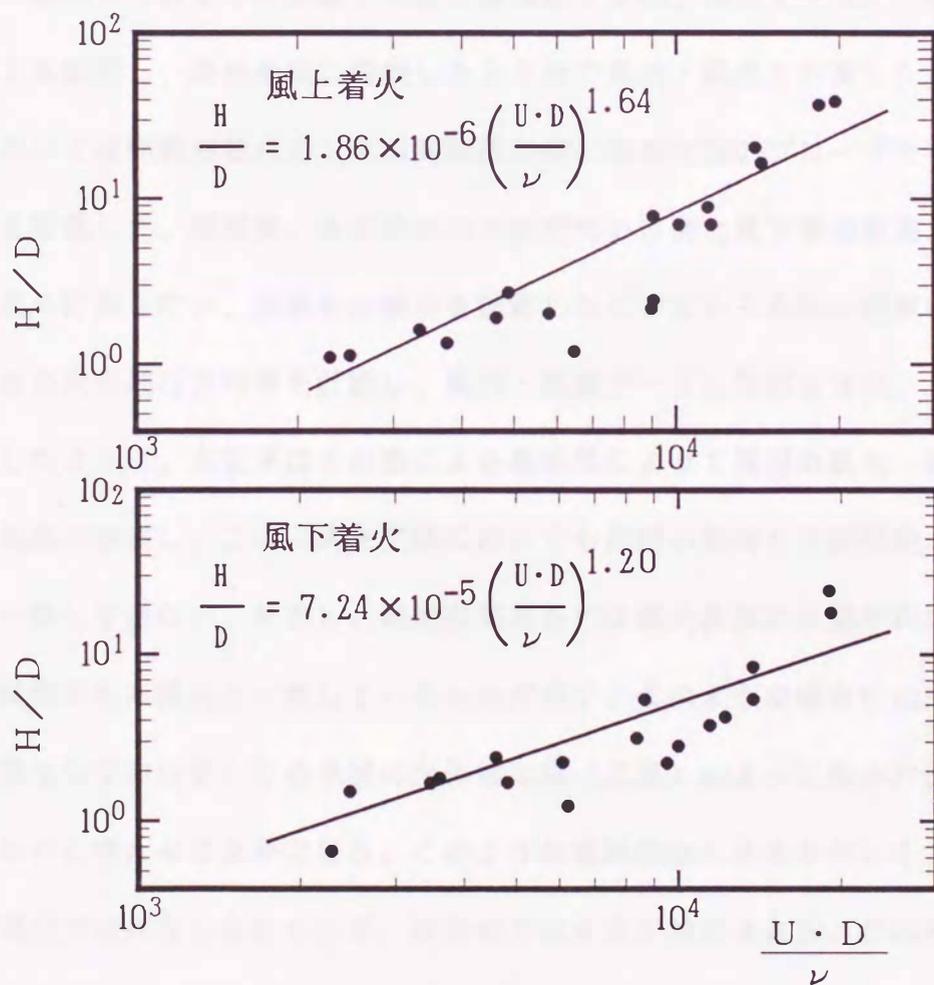


図-4-11 $\frac{U \cdot D}{\nu}$ と $\frac{H}{D}$ との関係

Ⅲ 風速推定式の検証

前項で提案した風速推定式の適合性を検証するためには、実際の林野火災において燃焼している樹木の近傍で風速を測定することが必要であるが、一般的な風速計では火中での測定に耐えられるものはなく、本研究では以下のような方法を採用した。

実際の林野火災時の風速測定は不可能に近いので、林野火災に近いと考えられる秋吉台および平尾台での山焼きを利用することにした。秋吉台においては前節で述べた秋吉台試験地での実験をそのまま解析することとした。また、平尾台においては1991年の山焼き時に、前節の平尾台試験地とは別に第2試験地として燃焼地域内の一斜面にこれまでの実験と同様の直径約10cm、長さ2～2.5mのスギ丸太を11本設置し、燃焼地域に隣接した2カ所で風向・風速を計測した。さらに平尾台においては燃焼地域内の1本の実験杭の横に無指向型のプローブを有する熱線風速計を設置した。燃焼後、各実験杭の片面燃焼の方向と風下側燃焼高および風上側燃焼高の計測を行い、燃焼中の様子を撮影したビデオから各杭の燃焼時刻およびそのときの火の進行方向等を計測し、風向・風速データと対応させた。

前述したように、火災中はその熱による局地風によって周囲の風向・風速とは異なる局地風が存在し、この山焼き実験においても周囲の風向と片面燃焼の方向とはあまり一致していない。ただし、燃焼初期あるいは鎮火直前の火勢が弱いときには、周囲で観測された風向と一致しているものが多く、このような場合には熱による局地風は発生しておらず、その地域の全体的な風（主風）によってのみ片面燃焼が発生したものと考えられることができる。このような実験杭は1988年、1991年ともに平尾台では存在しなかったが、秋吉台では4本が抽出された。これらの杭の燃焼時の主風速と(4.4)式あるいは(4.5)式の風速推定式による推定値とを表-4-3に示す。また、表-4-3には平尾台における熱線風速計による観測値と推定値も合わせて示されている。秋吉台における実測値と推定値とは差のあるも

のも存在するが全平均値は近似しており、風速計と杭の距離が100m~200m離れていること、野外におけるその他不定の条件等を考慮すれば十分な結果といえよう。さらに、平尾台における観測値は、風速計センサーに炎が接触して計測不能となる直前の1分間の平均風速であるが、推定値とほぼ等しくこの風速推定式の適用性が検証されたものと考えられる。

表-4-3 推定風速の検証結果

秋吉台試験地		
杭番号	推定風速 (m/s)	観測値 (m/s)
5	1.98	1.94
6	4.23	1.94
17	2.35	2.63
22	1.18	2.63
平均	2.44	2.29

平尾台試験地		
杭番号	推定風速 (m/s)	観測値 (m/s)
19	1.83	1.80

IV まとめ

本節においては、林野火災時の熱によって発生する局地風の風速を推定する方法を検討した。火災跡地の樹木に残された片面燃焼痕に着目して行った、風洞を用いた基礎的な燃焼実験（第2章）の結果と現地とのスケールの相違についての対応を検討し、風速推定式を提案した。また、現地山焼きを利用した実験において、提案した風速推定式を検証したところ、検証に用いたデータは多くはないものの非常に良好な結果が得られ、風速推定式が現地で適用可能であることが確認された。しかしながら、今回の風速推定式の検証では、風速は約2~3m/sの範囲のみであったので、今後、より大きな風速値での推定式の検証を行っていくことも必要であろう。

第6節 燃焼速度式の検証

第3章においてRothermelの燃焼速度式のわが国での適用性について検討を行い、風による割り増し係数の修正を必要とすることがわかり、風洞実験の結果を利用して、Rothermel式の修正式を提案した。ここでは山焼きを利用した現地実験でこの修正式の検証を行うことにした。

検証の場は秋吉台試験地であり、これまでと同様1990年の山焼きである。本実験には実験杭を37本設置していたが、Rothermel式は傾斜に関しては平地または斜面燃え上がり、風に関しては無風あるいは火の進行方向に対して順風の場合のみ適用できるモデルであり、さらに風速値を得るためには片面燃焼が生起していなければならないから、燃焼時に撮影したビデオ映像、片面燃焼の方向等から条件にみあったものを捜すと杭番号10、14および18の3本の杭が抽出された。その3本の杭の片面燃焼痕からその杭が燃焼したときの風速を推定し、さらにその付近の下層植生等の状態から計算に必要なパラメータ値を求め、燃焼速度を計算した。また、火災動態図およびビデオ画像より、その杭が燃焼したときの燃焼速度を求め実測値とした。その結果を表-4-4および図-4-12に示す。表-4-4および図-4-12には、前述の愛媛・香川県境林野火災における適用例をも示している。燃焼速度実測値は火災動態図より読み取ったが、愛媛・香川県境林野火災は表-1-12からわかるように、火災動態図における観測の間隔がほぼ6時間と非常に長く、その間、一様な速度で燃焼していったとは考え難いが、Rothermel式検証にあたっては、実際の林野火災のデータとして、一応の目安になると思われる。

データは少ないが、秋吉台においては、修正前のRothermel式による燃焼速度に比べて、修正式による計算結果は実測値とかなり近似しており、実用可能な範囲にあると考えられる。また、風速値が小さい愛媛・香川県境林野火災では、Rothermel式

表-4-4 燃焼速度の計算結果

杭番号	推定風速 (m/s)	燃焼速度実測値 (cm/s)	Rothermel式による計算結果 (cm/s)	修正した式による計算結果 (cm/s)
10	2.76	20.83	52.32	30.49
14	1.43	17.67	86.15	19.72
18	1.71	25.83	42.89	21.90
愛媛・香川県境火災	0.57	2.31	4.07	4.24
	1.03	2.31	6.38	5.38

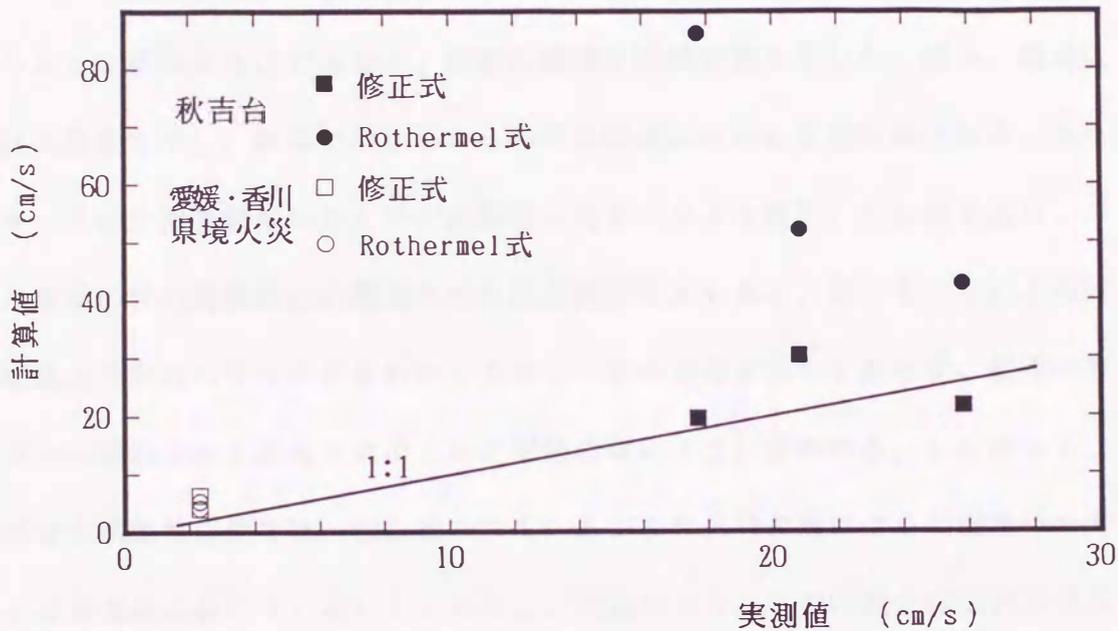


図-4-12 燃焼速度の実測値と計算値

と修正式の計算結果に大きな差は認められず、Rothermel式が当初の目的どおりに修正されていることを示している。愛媛・香川県境林野火災の燃焼速度の実測値と計算値の誤差率は100%前後と大きいですが、燃焼速度が小さいために誤差そのものは小さく、風速が小さい場合には実用上は問題ないと思われる。このように、修正したRothermel式が適用可能であるということばかりでなく、片面燃焼から推定した風速も適正な値であったことを示していると推察される。

第7節 燃焼動態の解析

I 秋吉台試験地

図-4-5に秋吉台試験地の燃焼動態図を示す。この年の山焼きは、前日までの断続的な降雨によって火入れ地域内はかなり湿潤であったと思われ、植生は燃焼しにくい状態であった。そのため試験地のある斜面下部より着火した火は試験地に到達する前に自然鎮火し、図-4-5に示されるように試験地内には横あるいは尾根の3カ所から火が進入した。したがって試験地内は、いわゆる斜面燃上り、燃下りというような単純なものではなく、非常に複雑な燃焼動態を示した。図中、黒点は実験杭の位置を示し、破線で示しているのが各時刻における延焼前線である。また、図-4-5は片面燃焼差のおよび片面燃焼方向をベクトル表示したものであり、ベクトル表示のない実験杭は未燃焼木または全面燃焼木である。図-4-5によれば片面燃焼の方向はバラツキがきわめて大きく一定の方向を示しておらず、斜面の方向あるいは燃焼中の主風向とはほとんど関係のないように思われる。したがって、この秋吉台試験地の例では一般に言われているような火災の熱による斜面全体の対流による局地風は吹いていないことになる。前述のようにこの山焼きは湿潤な状態で実施されたため、燃焼中に火炎はほとんど上がらなかったが、場所によっては短時間ではあるものの大きな火炎を生じて燃焼した部分もあった。そこで燃焼時のビデオ画像と詳細に照合すると、そのような場合にはそのすぐ周辺の実験杭の片面燃焼方向はその火炎の方向に向いていることが判明した。すなわち、大きな火炎が上がった場合は、その熱によってごく一部ではあるが局地風が発生していることになる。また、試験地中央部の燃焼時には、ある程度熱も高くなり斜面全体の対流による局地風が発生したと考えられ、片面燃焼の方向は斜面上部を向いている。このような局所のおよび全体的な対流風が発生していない場合には片面燃焼方向は主風向

と一致しているものが多い。これらのことから、秋吉台試験地の燃焼動態を以下のようなブロックに分割することができると考えられる。また、これを図示すると、図-4-13のようになる。

①燃焼初期A：燃焼が始まり、燃焼部分の空気が暖められ発生した、局所的な対流によって、風が火の方向を向いている時期で、全体の温度が高くないので、斜面全体の局地風は発生していない。風向は燃焼方向に対して逆風である。

②燃焼初期B：時間的には燃焼終期と同一であり、反対側の斜面から尾根を越えてきた火が斜面を下っている時期で、全体的な局地風は発生しておらず、風向は燃焼方向に対して順風である。

③燃焼中期A：まだ斜面上向きの局地風は発生していないが、燃焼場所付近の温度が上昇し始め、燃焼速度も次第に大きくなってきている。風向は燃焼方向に対して逆風である。

④燃焼中期B：燃焼場所付近の温度が上昇し、斜面上向きの局地風が発生し火が上向きに勢いよく進行している時期で、風向は燃焼方向に対して順風となっている。

⑤燃焼終期A：火が鎮火に向けて徐々に進行している時期で、燃焼場所付近の温度が中期ほど高くなく、局地風は発生せず主風向の影響を受けている時期である。風向は燃焼方向に対して順風である。

⑥燃焼終期B：燃焼終期Aと同様の時間であるが、火が斜面上向きに進行している。やはり主風の影響を受けており、風向は燃焼方向に対して逆風である。

前述のようにこの秋吉台試験地の山焼きは複雑な燃焼動態を示し、個々の実験杭の片面燃焼方向も一定ではないが、上記のようにブロック分けすることにより風との関係を明確にすることができるようである。そこで、より詳細な両者の関係を調べるために、各ブロックにおける燃焼方向、燃焼速度を燃焼動態図から求め、各ブロック内の実験杭の片面燃焼痕から推定された風向・風速との関係について考察した。本章第5節で提案した風速推定式によって推定された風速と燃焼速度との関係

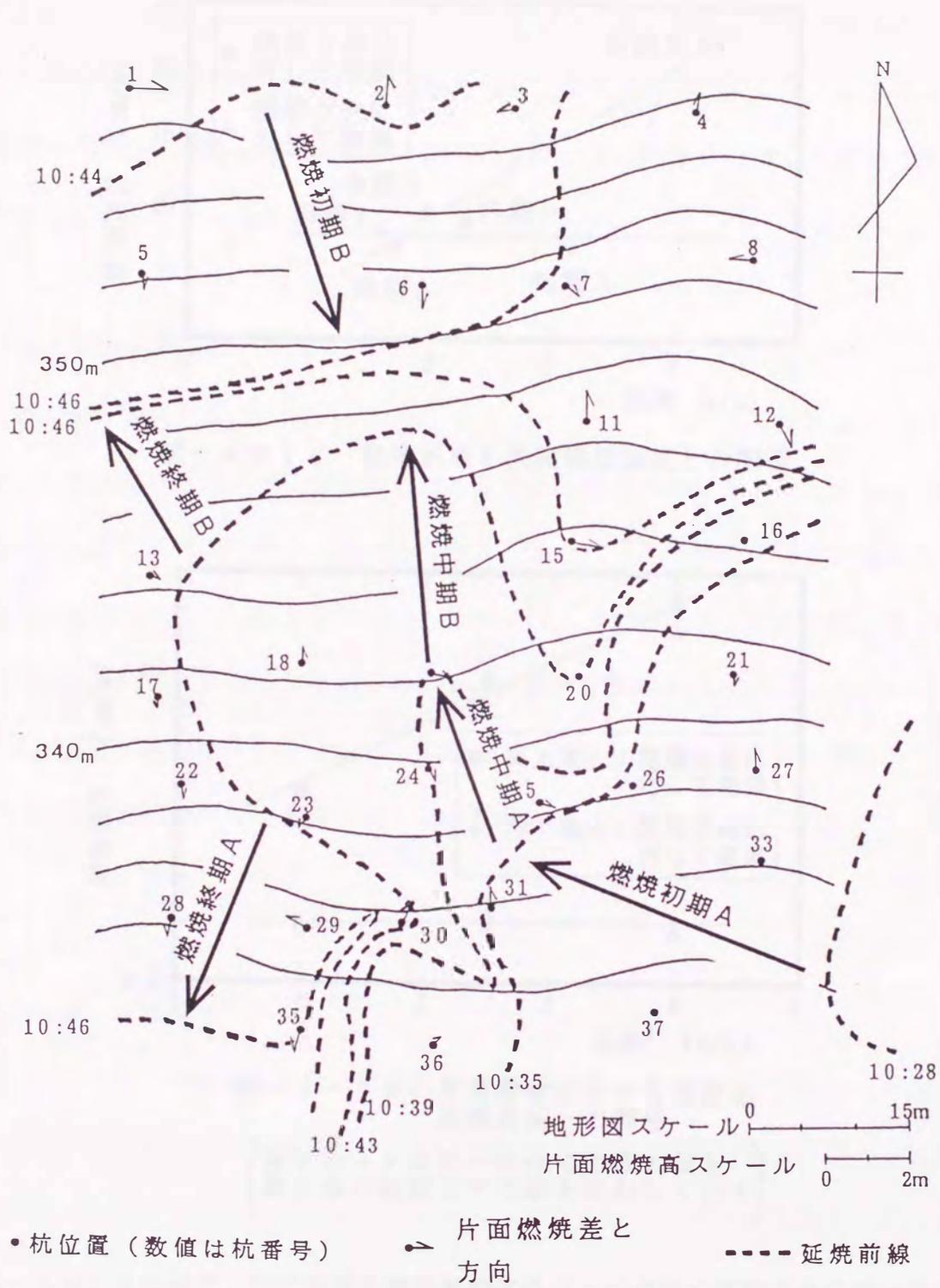


図-4-13 燃焼動態ブロック図
(秋吉台試験地)

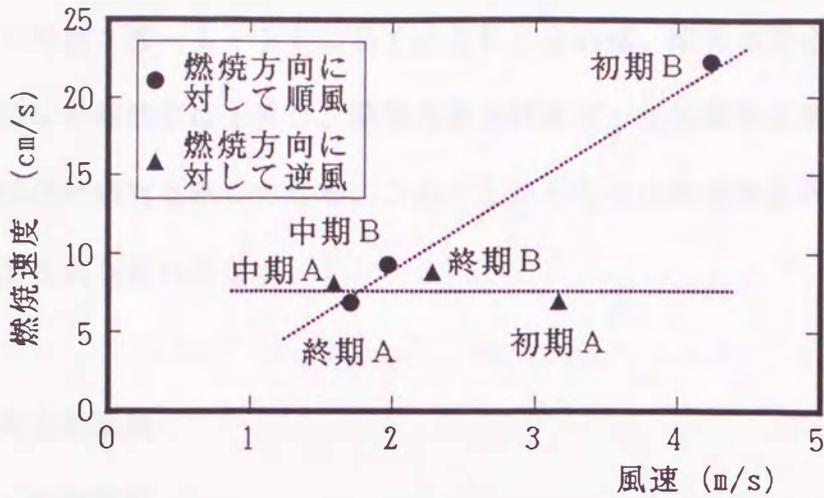


図-4-14 推定風速と実測燃烧速度との関係

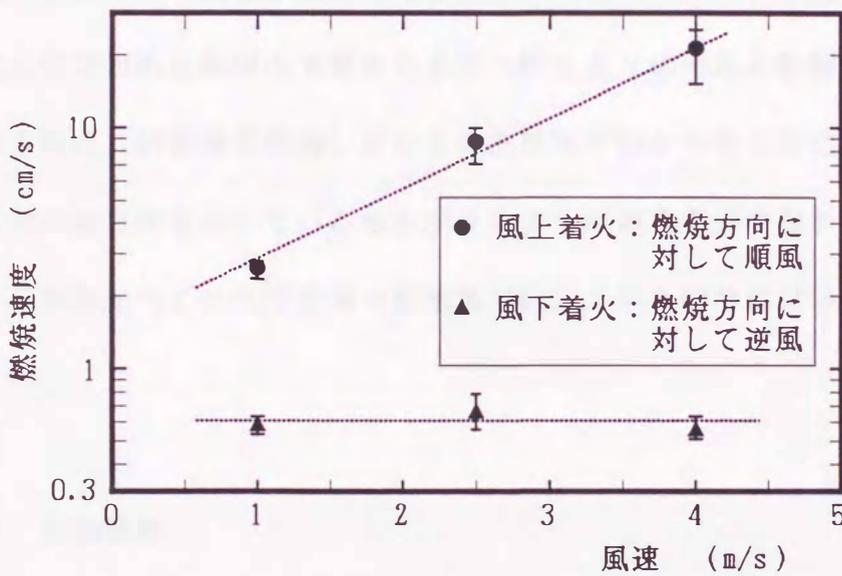


図-4-15 風洞実験における風速と燃烧速度との関係

(各プロットは同一条件での最大値と最小値の範囲と平均値を表わしている)

を図-4-14に示す。図における推定風速は各ブロック内の実験杭から求めた風速の平均値であるが、ブロック内の平均的な風向と逆向きの風向を示すデータは局所的変動として除外した。図から明らかなように燃烧方向に対して順風の場合は風速の増大にともない燃烧速度はほぼ直線的に増大し、逆風の場合は風速に対して燃烧速度は変化せず概略一定となっている。第2章における風洞実験においては燃烧

方向に対して順風の場合と逆風の場合を同一条件で実施したが、そのときの風速と燃焼速度との関係を図-4-15に示す。これによれば、順風の場合は風速に対してほぼ直線的に燃焼速度は上昇し、逆風の場合はほぼ一定の燃焼速度となっており、現地実験と同様の傾向を示している。このことからこの風速推定式の現地での適用性が再確認されたといえよう。

II 平尾台試験地

II-1 燃焼動態

図-4-7は試験地の燃焼動態ならびに片面燃焼差の観測結果を図-4-5と同様な方法で示したものである。図から明らかなように、この年の平尾台試験地の燃焼は秋吉台とは対照的に斜面の下部から上部へ燃え上りの一定の動態を示した。また片面燃焼方向は、試験地が燃焼したときの主風向が西から南に変化したのに対し、主風とは反対の南方向を向いているものが多いようにみえる。すなわち斜面の下部から上部へと試験地内には斜面全体の局地風が吹いていたのではないかと考えられる。

II-2 片面燃焼

上述のように片面燃焼の方向は斜面の傾斜方向と近似しているとみうけられるのでこれらの関係を詳しく検討した。まず、片面燃焼方向と傾斜方向との関係を図示すると図-4-16のようであり、両者がほぼ一致していることが確認された。そこで、8方位で計測された片面燃焼の方向および各杭の位置における最大傾斜の方向（斜面下部から上部への方向）を、北を基準に1から8までの数値で表現し、両者の差の絶対値の度数分布を図-4-17に示した。方位の差0は両者が一致していることを、4は正反対の方向であることを意味しているが、図-4-17によれば、差が1まですなわち 45° 以内のものが全体の約85%であり、差が2すなわ

ち90°以内でみると実に全体の約95%に達する。これらの結果から、片面燃焼方向、換言すれば斜面での風向は傾斜方向と一致しており、周辺で計測された主風向とはまったく逆であることから、熱による局地風が発生したといえる。秋吉台の山焼きでは非常に燃えにくい状態であったため、局地風はごく一部でみられたものの、斜面全体の局地風はほとんど発生していない。平尾台では比較的乾燥していたため燃焼しやすく、秋吉台に比べてかなりの発熱量であったと思われ、結果的に斜面全体の局地風が発生し、秋吉台と異なる様態を呈したものと考えられる。

このように発熱量の違いによって発生する局地風の状態は大きく異なると考えられるが、発熱量がそれほど変わらなければ斜面にそって吹く局地風の強さは傾斜の大小に影響されるのではないかと推察される。これは、第1章第2節の広島県大規模林野火災の解析において、延焼地域内に熱による局地風が発生している場合は、

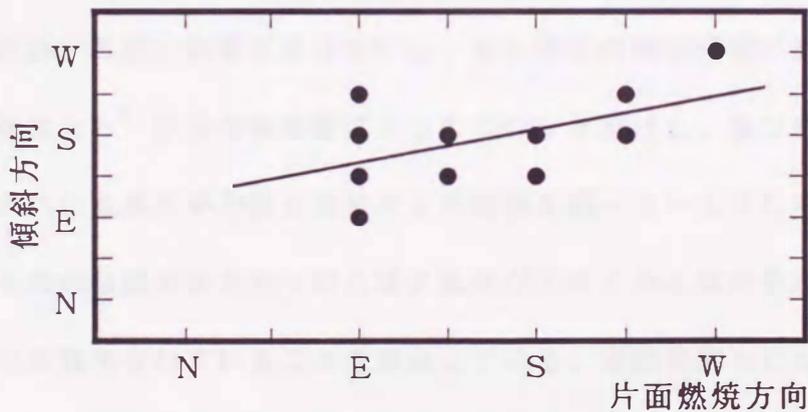


図-4-16 片面燃焼方向と傾斜方向との関係

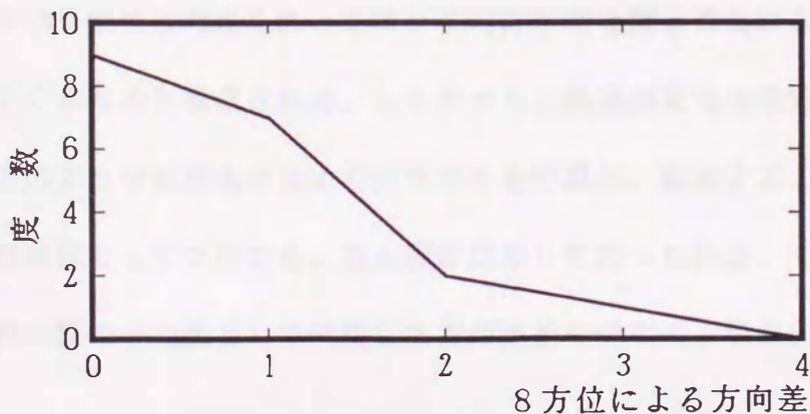


図-4-17 片面燃焼方向と傾斜方向の差の度数分布

燃焼方向は主風向・主風速の風ベクトルよりも、最大傾斜ベクトルに影響されるといふ結果によつても説明できる。そこで、各実験杭の位置における斜面傾斜角と風速との関係について考察した。風速については前述の風速推定式によつて求めた。ただし、全面燃焼木、未燃焼木のように片面燃焼が発生していない実験杭からは当然風速を推定することはできず、さらに風速推定式の関数形から片面燃焼の風上側燃焼高が0もしくは0に近い場合は適用できないため、最終的に風速を推定できたのは実験杭34本の内14本であつた。風上側燃焼高が0に近いときは風速推定式に含まれる片面燃焼比の値が大きくなり結果的に過大な風速値を算出することになるが、現地において風上側燃焼高が0に近い場合というのは、杭の根元に石等が存在する場合に限られ、例外として処理できると考えられる。このようにして推定された風速と傾斜角との関係を図-4-18に示しているが、図から明らかなように両者には特別の関係は認められない。

そこで、傾斜が風速に影響を及ぼすには、ある程度の傾斜空間が必要ではないかと考え、試験地を5°区分の傾斜階によつてブロック分けし、各ブロック内の実験杭から推定された風速の平均値と傾斜角との関係を図-4-19に示す。多少バラツキはあるものの傾斜角が大きくなるほど風速が大きくなる傾向を示しており、局地風が傾斜に影響を受けていることを表わしている。実験杭個々についてプロットした図-4-18において両者の関係が認められなかつたのは、植生の状態等の局所条件によるバラツキと考えられ、ブロック内の平均を採ることによつて全体的傾向が現われてくるものと推察される。したがつて、風速推定式の現地への適用にあつては、このような局所条件によるバラツキを考慮し、樹木1本1本から推定された単独の風速値としてではなく、ある程度広がりを持った部分、すなわち、この局地風の支配空間の平均値として利用した方が誤差も少なく、現実的であるように思われる。

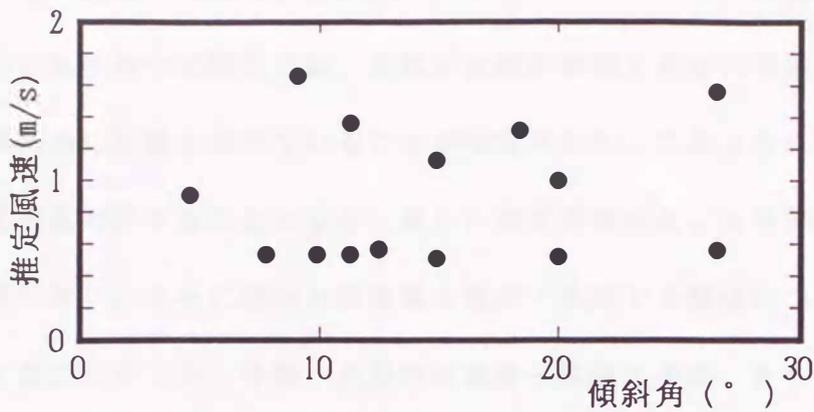


図-4-18 傾斜角と推定風速との関係
(実験杭個々のプロット)

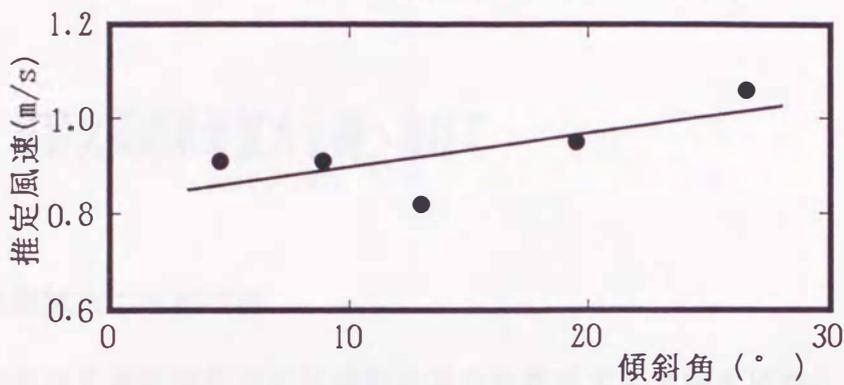


図-4-19 傾斜角と推定風速との関係
(傾斜階別の平均値)

Ⅲ 燃焼動態に関する結論

林野火災の大規模化という観点からみれば、この平尾台の燃焼動態は大規模林野火災の典型的なものと考えられ、秋吉台の場合はそれほど大規模にはならない、もしくは火災が鎮火に向かっているような状態を想定できよう。しかしながら、秋吉台の燃焼動態は林野火災における様々な動態が凝縮されているとも考えることができ、本実験において両試験地ともに燃焼時の風向・風速を推定することによりこれまでよりすすんだ解析が可能になったと思われる。

山焼きを利用した現地実験において前に提案した片面燃焼からの風速推定式を適用し、燃焼動態の解析ならびに風向・風速と地形との関係等について検討した。非常に複雑な燃焼動態を示した秋吉台試験地においては燃焼動態をブロック分けする

ことにより風向・風速と燃焼速度との関係が明らかになった。また斜面燃上りの一定の動態を示した平尾台試験地では、主風とは逆の斜面上向きの局地風が発生し、その風速が傾斜角に影響を受けていることが推定された。このように火災時の現地での風向・風速を推定することにより、新しい知見が得られ、より詳細な燃焼動態の解析も可能となり、さらに地形と局地風の風向・風速との関係についてもある程度明らかにすることができ、今後、火災時の風向・風速の予測、さらには林野火災の延焼拡大の予測につながるものと考えられる。

第8節 林野火災の延焼拡大予測へ向けて

I 延焼拡大の予測方法

本研究における最終的な目的は林野火災の延焼拡大の予測を可能にすることであり、予測が可能になれば効果的な消防、防火対策を確立できると考える。本研究では、この目的を達成するために種々、実験あるいは解析等を行ったが、延焼拡大の予測がすべて可能になったわけではなく、むしろ、予測法の確立へ向けての一步を踏み出した段階といえる。そこで、林野火災延焼拡大の予測方法についての基本的な考え方をここで整理して、予測法確立へ向けての方向づけをしたい。

林野火災延焼拡大予測のフローチャートを図-4-20に示している。延焼拡大の予測に対する基本的な考え方は、ある時点の延焼地域の形状、風向・風速、地形（傾斜 5° 区分）、林床可燃物（燃料）の状態等のデータより、任意の次の時点の延焼地域の形状を予測し、この作業を繰り返すというのが最も実用的であると考えられる。また、延焼地域の形状予測に関しては、火災の燃焼速度を基礎とし、燃焼速度の算定に必要なデータは、図-4-20にも示しているように、最終的には、風向・風速、燃料に関する諸データおよび火の進行方向である。この中で風向・風速は

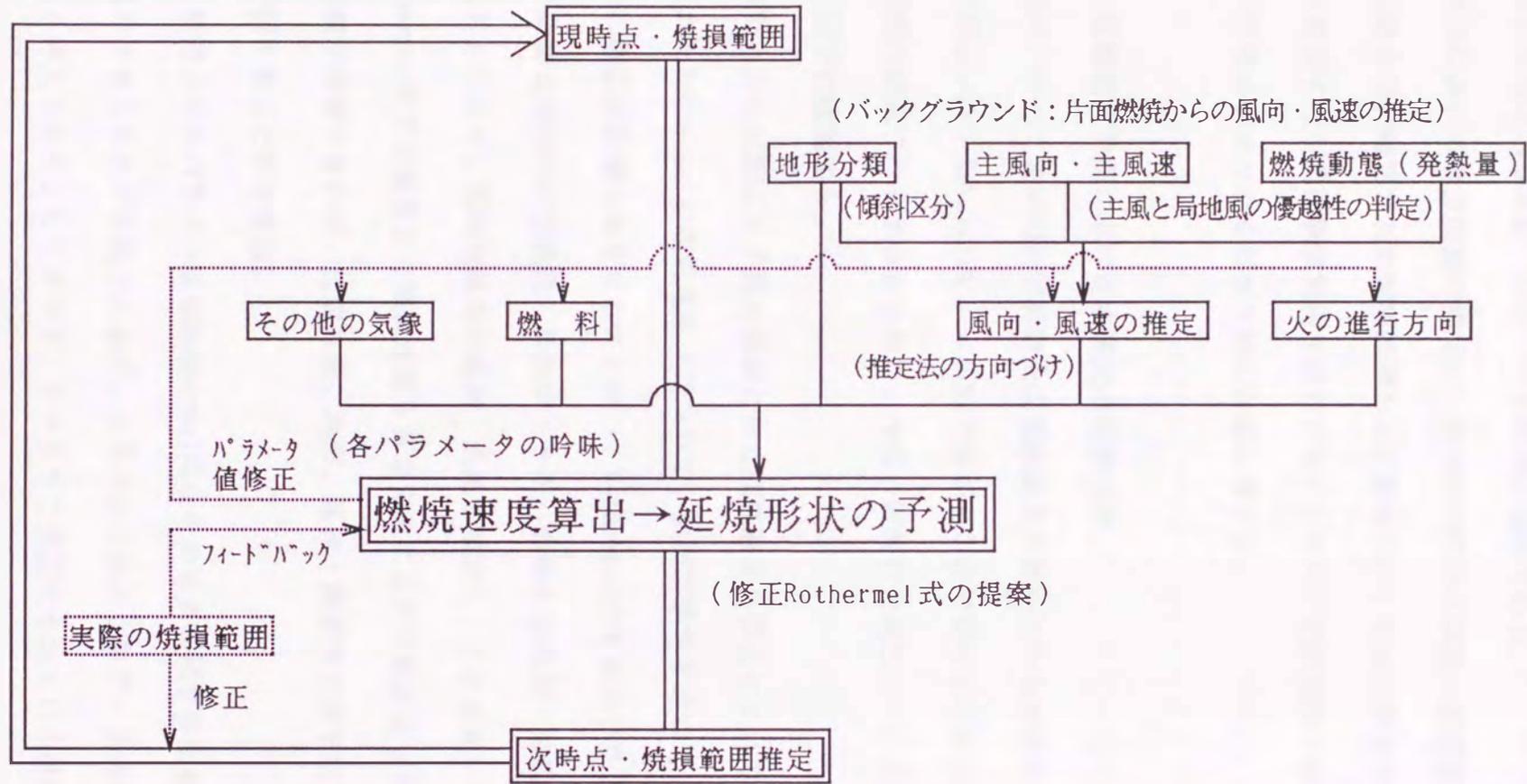


図-4-20 林野火災延焼拡大予測フローチャート

()内は本研究の位置づけあるいは成果の概要

延焼地域周辺で計測される主風向・主風速ばかりではなく、実際に延焼地域内で吹いていると推定される風向・風速データが特に重要である。

ある時点における焼損範囲を推定し、後にその時点の実際の焼損範囲が現地で計測された場合は、推定された焼損範囲との比較を行い、両者に誤差があるときは次の時点の計算を行う前に焼損範囲を修正するとともに、燃焼速度の計算に戻り、各パラメータ等のチェックを行って次の計算に備える。

II 延焼拡大予測における本研究の位置づけ

本研究は、すべて最終的には林野火災延焼拡大予測へとつながるものである。延焼拡大予測のシステムにおいて、本研究で何がどこまで明らかになったのかを明示し、本研究の位置づけをするとともに、今後の研究の方向性の一つの示唆にしたいと考え、以下に整理する。

1) 林野火災の延焼拡大予測の基礎となる燃焼速度の算出については、アメリカで提案されたRothermelの燃焼速度式について、風洞実験等を通じて、風速因子に関する部分に修正が必要であることがわかり、Rothermel式を修正した。Rothermel式に修正が必要となったのは風向・風速データがいわゆる主風向・主風速データを用いていたためであり、延焼地域内の風向・風速を推定し、これを用いている修正されたRothermel式では精度よく燃焼速度を算定することが可能となった。

燃焼速度が推定できれば、延焼方向、地形、風向・風速等の因子によって延焼の形状を予測することができる。

風向・風速以外のパラメータはRothermel式をそのまま利用するため、実測あるいは実験式で求めることが可能であるが、火災中にこのようなデータを得ることは困難であると考えられる。したがって、アメリカで実用化されている林野火災危険度予測システムに見られるような、林野の林床あるいは下層植生の状態の類型化を急ぎ、基礎的なデータを把握しておくことが必要であろう。

2) 風向・風速データの推定に関して、本研究では、樹木の片面燃焼からその木が燃焼したときの風速の推定式を提案し、精度よく推定できることを検証した。しかしながら、樹木の片面燃焼からの風向・風速の推定は、火災後の樹木を調査することによって初めて可能となるため、このことが延焼拡大予測に直結するわけではない。そこで、本研究の成果を活かすためには、多くの火災跡地の調査を行い、火災の燃焼動態、主風向・主風速、地形等の因子の諸条件に対して、延焼地域内の風向・風速がどのようになるのか、推定法を決定しておく必要がある。主風速が大きくなれば局地風よりも主風の影響の方が卓越するようであり、さらに局地風が斜面の傾斜に影響されているようであるので、それらの詳細な関連が明らかになれば、風向・風速の推定が可能である。このように、本研究において、これまで不明であった局地風の推定方法を示したことによって、実用的な延焼拡大予測が可能になっていくものと思われる。

また、ある地域において、出火地点と風向・風速等の気象条件を与えることによって、火災の延焼拡大のシミュレーションが可能となり、林野火災に対する危険度判定ならびに防火帯等の効果的な設置場所等についての知見が得られるであろう。

第5章 結 論

本研究では、日本の林野火災の特徴を明らかにし、そのうえで、林野火災の動態解析に必要不可欠である火災時の燃焼地域内の風向・風速を推定する手段として樹木の片面燃焼に着目した。片面燃焼に関する基礎的な風洞実験等を行い、風速推定式を提案し、現地で検証した結果、非常に精度よく風向・風速を推定できることが確認された。また、延焼拡大に密接に関係する、燃焼速度については、アメリカ合衆国で提案されたRothermel式について検討し、その修正式を提案した。本研究で得られた結果を要約すると以下ようになる。

1. 日本における林野火災は、件数では1%にも満たない50ha以上の大規模林野火災が面積では全体の46.6%と半分近くを占めており、大規模林野火災の重要性が明らかになった。

2. 大規模林野火災はそのほとんどが2月から5月に集中しており、季節的集中性がみられる。また、地域的にも大規模林野火災が発生しやすいところがあり、地域的集中性も顕著である。これらの理由として、火災の発生そのものはタバコの火の不始末等、人為的要因が大きい、その林野火災が大規模化するか否かは、その地域、季節の植生条件、地形条件、気象条件によるところが大きいと推察された。

3. 大規模林野火災の一事例である1985年の愛媛・香川県境林野火災において、燃焼程度を外的基準とした数量化Ⅱ類の解析では、地被条件では草地・裸地、疎な林分が燃焼程度を激しくし、また、谷部よりも尾根部の方が燃焼程度が激しくなる傾向にある。これは、下層植生の多寡、地表近くの水分条件等による影響と考えられた。

4. 広島県に発生した大規模林野火災の火災動態の解析において、主燃焼方向と最大傾斜方向とは相関が高く、傾斜地で発生する日本の林野火災では、火災による

空気の上昇気流によって斜面にそった延焼拡大が多いものと推察された。

5. 同じ広島県データの解析で、最大傾斜方向と風向・風速によって主燃焼方向の推定式を提案した。主燃焼方向の燃焼ベクトルを \vec{E} 、最大傾斜角と最大傾斜方向による最大傾斜ベクトルを \vec{S} 、風向・風速による風ベクトルを \vec{W} とすれば、

$$p\vec{S} + q\vec{W} = \vec{E}$$

で表わすことができる。ここで、 p 、 q は \vec{E} に及ぼす \vec{S} 、 \vec{W} の影響度を表わす補正係数であり、ここでは $p=11.07$ 、 $q=3.40$ となり、良好な推定結果となった。

6. 広島県の解析では、上記4および5のように良好な結果が得られたものもあるが、主に風速データが関連するもの、例えば燃焼速度等については一定の傾向が得られず、風向・風速データが精度的に問題であることが考えられた。火災時の現地の風向・風速データを知ることができない以上、このような解析方法には限界があることがわかった。

7. 愛媛・香川県境林野火災における樹木の片面燃焼調査の結果、片面燃焼の風上側燃焼高は斜面燃え上がりより燃え下がりの方が、また燃焼程度が激しくなるほど大きくなる傾向を示した。それに対して、片面燃焼の風下側燃焼高に最も大きく影響するのは樹木の直径であり、直径が大きくなるほど風下側燃焼高は大きくなる。

8. 片面燃焼に関する風洞実験の結果、片面燃焼の方向は風上側から着火した場合も風下側から着火した場合もいずれにおいても風下側の燃焼痕が風上側よりも高く、実際の火災跡地においてもその樹木が燃焼したときの風向を容易に知ることができる。

9. 同様に風洞実験より、片面燃焼の風下側燃焼高は樹木の直径と関係が強く、風上側燃焼高は風速の大小を反映する因子であることが判明した。そこで直径および風速両者の影響を表わす因子として、片面燃焼差が有効であることを見いだした。

さらに燃焼材料の量が増加した場合でも片面燃焼差の因子には変化なく、現地において林床可燃物の量が異なる場合でも有効な指標になると考えた。

10. 片面燃焼差は、風洞という限られた空間と現地ではスケールが異なるため、異なるスケールでも共通の指標となる片面燃焼比の因子を導入し、両者の積（H）、樹木の直径（D）、風速（U）、空気の粘性係数（ μ ）および空気の密度（ ρ ）の関係因子の次元解析により、

$$\text{風上着火：} \frac{H}{D} = 1.86 \times 10^{-6} \left(\frac{U \cdot D}{\nu} \right)^{1.64}$$

$$\text{風下着火：} \frac{H}{D} = 7.24 \times 10^{-5} \left(\frac{U \cdot D}{\nu} \right)^{1.20}$$

ただし、 ν ：動粘性係数（ $\nu = \mu / \rho$ ）

なる風速推定式を提案した。

11. 林野火災の延焼拡大の重要な因子である燃焼速度に関して、アメリカ合衆国で提案されているRothermel式を吟味した結果、風速に関する部分を修正する必要があることがわかり、修正式を提案した。

12. 山口県秋吉台、福岡県平尾台の山焼きを利用して現地実験を行い、風速推定式の適合性を検証した結果、非常に精度よく燃焼時の風速を推定できることがわかった。ただし、検証を行った山焼き時の風速が2.0～3.0 m/sであったので、これより大きな風速については今後検討する必要がある。

13. Rothermelの燃焼速度の修正式について、秋吉台の山焼きで適用してみると、実測値と計算値が比較的一致しており、適用可能であることが判明した。

14. 延焼拡大予測の基礎となるのは燃焼速度であり、燃焼速度（風下側への最大速度）が推定できれば、風上側へは一定の速度で燃焼することにより、延焼形状が予測できると考えられた。

15. 片面燃焼からその木が燃焼したときの風向・風速を推定可能であることを

利用して、あらかじめ局地風の風向・風速データと地形、主風向・主風速、燃焼動態等との関係を明らかにしておくことにより、延焼中であっても、燃焼速度の算定に必要な風向・風速の推定が可能になると考えられる。また、その結果、シミュレーションによる事前の危険地予測が可能になると思われる。

第6章 総括および今後の課題

本研究は林野火災における延焼拡大の予測に関して、基礎的な実験、実態的な考察、現地への応用等、物理的あるいは統計的手法をも駆使して総合的な検討を行ったものである。

第1章では、日本におけるこれまでの林野火災の事例を基に統計的な解析によって日本の林野火災の特徴を見いだした。さらに、過去の大規模林野火災の実態を明らかにし、その燃焼動態の解析を通じて、林野火災研究の支障は解析に用いる風向・風速データが火災現場から数キロメートル以上も離れている場合が多く、精度的に問題があり、しかも火災時の熱による局地風が考慮されていないこと等を指摘した。また、火災時の現地での風向・風速を表わす重要な指標と考えられる樹木の片面燃焼について現地の実態を考察するとともに、火災跡地の荒廃等の状況を解析し、林野火災研究の重要性を示した。

第2章においては風洞を用いた片面燃焼に関する基礎的な燃焼実験を行い、片面燃焼の方向、風下側燃焼高および風上側燃焼高の特性を明らかにし、片面燃焼の指標とすべき因子について考察した。

第3章においては、林野火災の延焼拡大に密接な関係のある燃焼速度について、アメリカ合衆国で提案されたRothermel式を修正した。その中で、Rothermel式の問題点は風速の影響を表わす定数の決定にあたって、現地の局地風でなく、主風速を用いたために適合しなくなったと考えられ、火災時の現地の風向・風速を知る重要性がここでも指摘された。

第4章では、風洞実験結果を現地と結びつけるためのステップとして、山口県秋吉台、福岡県平尾台での山焼きを利用した現地実験を行った。第2章の風洞実験結果を発展させ、風速推定式を提案し、適合性についても検証を行った。また、第3

章において修正したRothermel式についても検証した結果、十分適用可能であることが確かめられた。さらに、このようにして山焼き時の風向、風速を推定することにより、風速と傾斜との関係や、その他これまで不明であった火災動態についての新しい知見を得ることができた。

しかしながら、提案した片面燃焼からの風速推定式において、風洞実験結果を現地に適用する際のスケールの問題から、[片面燃焼差×片面燃焼比]なる因子を用いたが、これがどういう物理的意味を持つ因子であるのか不明確となり、厳密な意味での片面燃焼の定量化ができたとはいえない。さらに、風速推定式の精度の検証につき、今後、より幅広い風速値の範囲で検討する必要がある。

また、本研究において林野火災の延焼拡大に関してすべてが明らかになった訳ではなく、むしろ火災の延焼拡大予測に関してはようやくその緒についたと考えるべきであろう。樹木の片面燃焼痕からその木が燃焼したときの風向・風速を推定可能となったが、今後数多くの火災跡地での調査を実施し、風向・風速と地形、燃焼動態あるいは主風向・主風速との関係をより明確にすることによって、林野火災の延焼拡大予測に直接つながっていくと考えられる。また、本研究では触れなかったが、林野火災における、いわゆる『樹冠火』および『飛び火』も重要な課題であり、この点も含めた燃焼速度の問題もさらに有機的に結合されなければならない。

このように残された問題点も多く、それらを解決し日本における林野火災の延焼拡大予測モデルを構築し、林野火災の消防、防火に資することが急がれている。これについての詳細な検討は、今後の研究課題としたい。

謝 辞

本研究を遂行するにあたって、多くの方々のご指導、ご助言、ご協力をいただきました。まず、九州大学農学部、竹下敬司教授には終始適切なご指導、ご鞭撻を賜った。また、愛媛大学農学部、小川 滋教授には、原稿のご校閲、ならびに現地火災跡地調査、室内実験、現地山焼き実験等、研究全体について、種々、有益なご指導、ご助言を、さらに九州大学農学部、中尾博美助教授、同じく丸谷知己助教授には原稿のご校閲と、有益なご指導、ご助言をそれぞれいただいた。そして佐賀大学理工学部、岸原信義教授には、現地調査、現地山焼き実験等、研究全般にわたって、ご教示いただいた。

愛媛大学農学部、伏見知道教授には適宜、有益なご助言をいただくとともに、種々の便宜を図っていただいた。愛媛大学農学部、江崎次夫助教授には、現地実験、現地調査、特に、植生ならびに土壌調査において、ご指導、ご助言をいただいた。また、本研究の遂行にあたっては、種々の便宜を図っていただいた。九州大学熱帯農学研究センター、綿引 靖助手、同農学部、長沢 喬教務員、佐賀大学理工学部、下村栄二技官（現、建設省九州地方建設局）には、現地実験における資材の設営、観測等、多大のご協力を賜った。佐賀大学理工学部、大串浩一助手には、実験結果の解析手法等に関する助言をいただいた。

現地調査、現地実験、室内実験ならびに資料整理、計算等、当時の愛媛大学農学部の大学院生、学部学生であった、鈴木教幸、丹原守雄、ラル サマラコーン、川添 斉、白石友志、神鳥浩明の各位をはじめ、特に現地山焼き実験においては、愛媛大学農学部、佐賀大学理工学部の多くの学生諸氏にご協力をいただいた。

さらに、現地調査、現地実験および資料収集においては、宇摩地区消防本部（愛媛）ならびに地元消防団、広島県内各市町村役場、山口県美東町役場、福岡県平尾

台町内会の方々には、種々の便宜を図っていただくとともに、直接的、間接的にご援助いただいた。

以上、本研究の遂行にあたり、絶大なるご支援をいただいた方々に対し、ここに記して、深甚なる敬意と感謝を捧げます。

なお、計算は愛媛大学情報処理センター、FACOM M-360AP、FACOM M-770/6、九州大学大型計算機センター、FACOM M-780/20を使用した。また、本研究の一部は、平成2年度および平成3年度、文部省科学研究費補助金奨励研究Aの援助によるものである。

引用文献

- 1) Albini, F. A.: Potential Spotting Distance from Wind-Driven Surface Fires. Research Paper, USDA Forest Service INT-309, 27pp, 1983
- 2) Albini, F. A.: Spot Fire Distance from Isolated Sources--Extensions of a Predictive Model. Research Note, USDA Forest Service INT-309, 9pp, 1981
- 3) Anderson, H. E.: Calculating Fire Size and Perimeter Growth. Fire Management Notes 45, 25-30, 1984
- 4) Andrews, P. L.: BAHAVE: Fire Behavior prediction and Fuel Modeling System- Burn Subsystem Part 1. General Technical Report, USDA Forest Service INT-194, 130pp, 1986
- 5) 浅野猪久夫編：木材の事典。朝倉書店，東京。434-435，1982
- 6) Bradshaw L. S., Deeming, J. E., Burgan, R. E. and Cohen, J. D.: The 1978 National Fire-Danger Rating System: Technical Documentation. General Technical Report, USDA Forest Service INT-169, 44pp, 1984
- 7) Bratten, F. W.: Probability Model for Analyzing Fire Management Alternatives: theory and structure. USDA Forest Service PSW-66, 11pp, 1982
- 8) Brown, A. A. and Davis, K. P.: Forest Fire: Control and Use. McGraw-Hill Book Company, 686pp, 1959
- 9) 地域防災データ総覧編集委員会編：地域防災データ総覧 風水害・火災編。消防科学総合センター，東京，341pp，1985
- 10) Cohen, J. D. and Deeming, J. E.: The National Fire-Danger Rating System: basic equations. General Technical Report, USDA Forest

Service PSW-82, 16pp, 1985

- 11) 江崎次夫・小川 滋・井上章二・山本正男・藤久正文・岸原信義：林野火災大規模化の要因解明と火災跡地の環境保全に関する研究（Ⅲ）－火災跡地の植生回復と浸透能の変化について－． 98回日本林学会大会発表論文集， 581－584， 1987
- 12) 江崎次夫・小川 滋・井上章二・山本正男・藤久正文・尾上清利・岸原信義：水土保全機能の見地からの森林再生に関する研究（Ⅰ）－山火事跡地の植生回復と森林再生について－． 日本林学会九州支部研究論文集， 295－296， 1987
- 13) Fischer W. C.: Photo Guide for Appraising Downed Woody Fuels in Montana Forests. General Technical Report, USDA Forest Service INT-97, 133pp, 1981
- 14) Fons, W. R.: Analysis of Fire Spread in Light Forest Fuels. Journal of Agricultural Research, 72(3), 93-121, 1946
- 15) Frandsen, W. H.: Fire Spread through Porous Fuels from the Conservation of Energy. Combustion and Flame 16, 9-16, 1971
- 16) 福島敏彦・竹下敬司：年平均風速と蒸散条件の推定について． 福岡県林業試験場時報， 18， 21－40， 1966
- 17) Fuller, Margaret: Forest Fires, John Wiley & Sons, 238pp, 1991
- 18) 後藤義明・新田隆三・森澤 猛：地表火によるスギ樹幹の火傷高． 38回日本林学会関東支部論文集， 235－237， 1986
- 19) 後藤義明・新田隆三・森澤 猛：樹幹火傷の分布からみた林野火災の延焼経過－筑波山スギ林火災における例－． 98回日本林学会大会発表論文集， 589－591， 1987
- 20) 後藤義明：最近の林野火災の特徴と問題点． 山林1247， 30－35， 19

88

- 21) 後藤義明・大谷義一：林野火災の概念と研究動向．森林立地XXX(2)，41-56，1988
- 22) 本間 仁：水理学．丸善，東京，233pp，1978
- 23) 飯泉 茂編：ファイアーエコロジー．東海大学出版会，東京，192pp，1991
- 24) 井上章二：人工降雨による盛土ノリ面の表面侵食に関する実験的研究．愛媛大学農学部演習林報告18，81-88，1981
- 25) 井上章二：人工降雨装置による斜面侵食に関する研究（V） 一流出土砂におよぼす土の粒度の影響一．日本林学会九州支部研究論文集，36，299-300，1983
- 26) Inoue, S.: Mechanism of soil erosion by raindrop impacts. Proceedings of the International Symposium on erosion, debris flow and disaster prevention, 35-38, 1985
- 27) 井上章二：盛土ノリ面の表面侵食に関する研究（II） 一雨滴衝撃力と掃流力の相互作用について一．第97回日本林学会大会発表論文集，615-616，1986
- 28) 井上章二：山林地災害としての林野火災．治山・砂防 論説評論集，121-125，1991
- 29) 井上章二・小川 滋・江崎次夫・丹原守雄・岸原信義：林野火災跡地における水土の流出特性に関する研究．日本林学会誌69（10），401-406，1987
- 30) 井上章二・小川 滋・岸原信義：林野火災における樹木の片面燃焼に関する基礎的・応用的研究（I） 一風洞実験による燃焼痕の解析と風速推定式の検討一．日本火災学会論文集投稿中

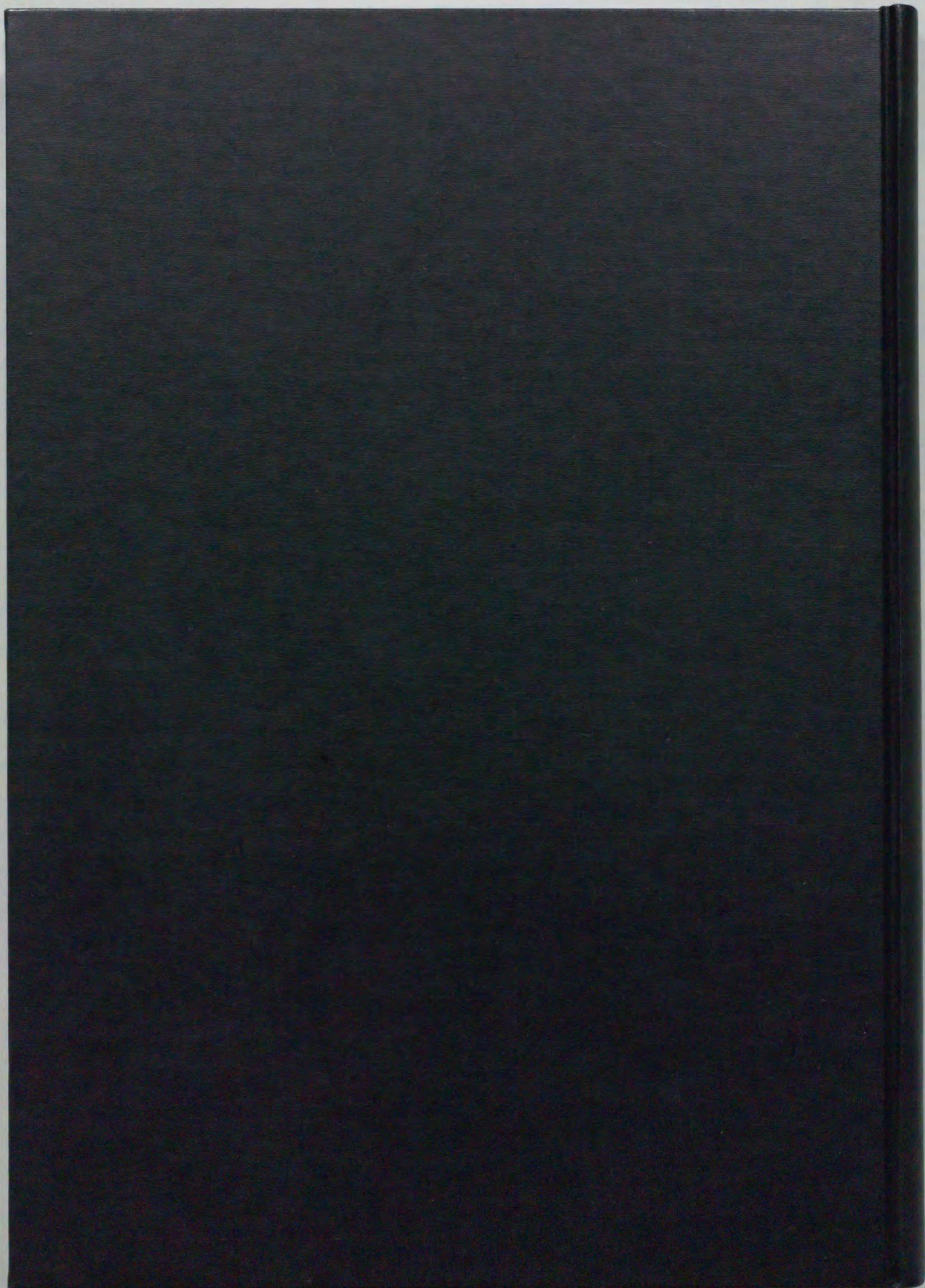
- 31) 岩川幹夫・新田隆三：愛媛・香川県境林野火災の概況。林試場報 251, 5-8, 1985
- 32) Kessell, S. R.: Gradient Modeling Resource and Fire Management, Springer-Verlag, 432pp, 1979
- 33) Kirkby, M. J. and Morgan, R. P. C.: Soil erosion, John Wiley & Sons, 312pp, 1978
- 34) 岸原信義・照井隆一：岩手県の林野火災大規模化の気象。自然災害特別研究研究成果, No. B-58-1, 43-52, 1984
- 35) 岸原信義・照井隆一：林野火災の地域性に関する研究 (I) -岩手県における林野火災の大規模化の地域性について-。第95回日本林学会大会発表論文集, 565-566, 1984
- 36) 岸原信義・小川 滋・井上章二・鈴木教幸：林野火災大規模化の要因解明と火災跡地の環境保全 (水・土保全) に関する研究 (IV) -林野火災の統計的検討-。第98回日本林学会大会発表論文集, 585-587, 1987.
- 37) 小林忠一・玉井幸治・服部重昭・西山嘉寛：林野火災の延焼速度に関する実験的研究 -傾斜角と林床可燃物量の影響-。日本林学会誌73 (1), 73-77, 1991
- 38) 国立天文台編：理科年表。丸善, 東京, 443-448, 1990
- 39) 近藤純正：1983年4月27日の林野火災を大規模化させた気象は何か (解説)。自然災害特別研究研究成果, No. B-58-1, 6-17, 1984
- 40) Levine, J. S.: Global Biomass Burning. The Massachusetts Institute of Technology Press, 569pp, 1991
- 41) 三浦 修・富士田裕子：林野火災が土壌におよぼす影響。日産科学振興財団助成 林野火災の生態 (飯泉 茂編), 99-117, 1987
- 42) 木材工業ハンドブック編集委員会：木材工業ハンドブック。丸善, 東京, 95

- 7-959, 1982
- 43) 本木 茂・山下邦博・後藤義明：森林の防火機能．日本治山治水協会，88 p p, 1991
- 44) 内藤俊彦・岩波悠紀・飯泉 茂：青森県小田川山のヒバ林の山火に関する研究，日本生態学会誌21，192-197，1971
- 45) 内藤俊彦・菅原亀悦・岩波悠紀・飯泉 茂：宮城県蒲生海岸における松林の火災による被害について，日本生態学会誌17，121-125，1967
- 46) 中村貞一・福田竜二・松本常世：山火事の予防と延焼防止法の研究 第1報 金網スクリーン防火線の効果（予報），島根農科大学研究報告9，71-74，1961
- 47) 中村貞一：山火事燃焼機構の研究 第1報 連続する燃材の延焼性と密度との関係，島根農科大学研究報告11，73-76，1963
- 48) 中村貞一：山火事燃焼機構の研究 第2報 不連続な材料の延焼性と密度との関係，島根農科大学研究報告11，77-79，1963
- 49) 中村貞一：山火事燃焼機構の研究 第3報 燃焼面の勾配と延焼速度との関係，島根農科大学研究報告13，93-97，1964
- 50) 小川 滋・井上章二・江崎次夫・香川尚徳・岸原信義：林野火災大規模化の要因解明と火災跡地の環境保全に関する研究（Ⅱ） -火災跡地における水土の流出特性について-．第97回日本林学会大会発表論文集：557~559，1986
- 51) 小川 滋・井上章二・岸原信義・下村栄二：林野火災大規模化の機構解明に関する研究 -林野火災動態図の解析-．愛媛大学農学部演習林報告，143-148，1988
- 52) 岡上正夫・井上 桂：森林火災の研究（第1報）焼止り線の研究，日本火災学論，52-54，1955

- 53) 大谷義一・玉井幸治・後藤義明・森澤 猛：群発林野火災発生時の気象（Ⅱ）
—火災発生と月降水量および先行降雨指標（API）との関係—。39回日本
林学会関東支部論文集，239—240，1987
- 54) 大谷義一・玉井幸治・後藤義明・森澤 猛：乾燥指標としてのAPIとの林野
火災発生。第99回日本林学会大会発表論文集，601—602，1988
- 55) Pyne, S. J.: Introduction to Wildland Fire, John Wiley & Sons, 455pp,
1984
- 56) Rothermel, R. C.: A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in
Wildland Fuels. Research Paper, USDA Forest Service INT-115, 40pp,
1972
- 57) Rothermel, R. C.: How to Predict the Spread and Intensity of Forest
and Range Fires. USDA Forest Service INT-143, 161pp, 1983
- 58) 消防庁：火災年報6—41，1949—1984
- 59) 消防庁：林野火災対策資料，1977—1985
- 60) 消防庁：林野火災拡大危険区域予測調査。林野火災拡大危険区域予測調査報告
書，pp95，1985
- 61) 消防庁編：消防白書，大蔵省印刷局，東京，333pp，1991
- 62) 鈴木栄一：気象統計学。地人書館，東京，314pp，1977
- 63) 鈴木清太郎：火災学。地球出版，東京，125pp，1949
- 64) 玉井幸治・後藤義明・笹沼たつ・大谷義一：群発林野火災発生時の気象（Ⅰ）
—福島県の事例—。39回日本林学会関東支部論文集，237—238，18
97
- 65) Tiedemann, A. R., Conrad C. E., Dietrich, J.H., Hornbeck, J. W.,
Megahan, W. F., Viereck, L. A. and Wade, D. D.: Effects of fire on
water. General Technical Report WO-10, USDA Forest Service, 1-28,

1979

- 66) 椿東一郎：水理学Ⅰ．森北出版，東京，208pp，1979
- 67) 椿東一郎：水理学Ⅱ．森北出版，東京，272pp，1980
- 68) Wells, C. G., Campbell, R. E., DeBanu, L. F., Lewis, C. E., Fredriksen, R. H., Franklin, E. C., Froelich, R. C. and Dunn, P. H.: Effects of fire on soil. General Technical Report WO-7, USDA Forest Service, 1-34, 1979
- 69) 山下邦博：林野火災と地図，地図情報，4-7，1985
- 70) 山下邦博：愛媛・香川県境林野火災について，消防科学と情報，23-27，1985
- 71) 山下邦博・後藤義明：森林下層植物の着火危険に関する研究（予備実験）．9回日本林学会大会発表論文集，563-564，1986
- 72) 山下邦博：針葉樹と広葉樹の発火性の相違について，日本火災学会誌，12-18，1986



inches 1 2 3 4 5 6 7 8
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 **M** 8 9 10 11 12 13 14 15 **B** 17 18 19

