

氏 名 (本籍)	いわ 岩	なみ 波	ゆう 悠	き 紀 (長野県)
学 位 の 種 類	農	学	博	士
学 位 記 番 号	農	第	4 4	号
学位授与年月日	昭和 4 6 年 4 月 1 5 日			
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 2 項該当			
最 終 学 歴	昭和 3 3 年 3 月 東北大学農学部卒業			
学位論文題目	草地における火入れ温度並びに火入れ がススキの成育に与える影響			

	(主 査)
論文審査委員	教授 輪 田 潔 教授 吉 田 重 郎
	教授 角 田 重 三 郎

論文内容要旨

わが国をはじめ各国において、自然草地の維持管理や草地改良または林地造成のために、古くから火入れが行なわれてきた。しかし野外における高温測定の困難さのために、諸外国においても、今日まで火入れ時の温度変化の実態は充分に明らかにされなかった。

本研究は、先づ野外における高温測定法について改良を加え、それを用いて、川渡、仙台、南蔵王などのススキ型、シバ型、ササ型の自然草地について、火入れ温度の測定を行ないこれら50例の観測を通じ、火入れ時の温度変化および燃焼の実態を究明した(第1部)。その上で、ススキの生育並びに再生過程に与える火入れの影響を調べ、草地における火入れの効果を考察した(第2部)。

第1部 草地における火入れ温度

1 火入れ温度の測定法の改良

火入れ温度変化の観察は、熱電対の漏電と短絡防止の有効かつ簡便な方法がないために、充分な観測結果が得られていなかった。著者は各種の測温法を比較検討し、鉄・コンスタンタン熱電対が適当であることを認め、かつ火入れ温度の測定に当たっては、熱電対の素線を互いに glassfiber tube をかぶせて電気的に絶縁し、また熱電対の温度変化に対する追従性を検討し、感温部の熱容量を小さくすることによって、遅れの係数 (time constant) を 6-8 sec 程度まで下げることができた。更に、熱電対の信号を完全に記録するために固有振動数約 10% の高感度 galvanometer を装備した oscillograph recorder を使用するなどの工夫を重ねた。その結果地下 10 cm から地上 2 m にわたる十数ヶ所の温度変化を同時記録し、かつ記録は 1 sec 間隔で、気温の変化は 1℃、地表温および地温の変化は 0.2℃まで読みとった。

2 燃料とその燃焼状態

火入れが成功するためには、燃料(植物体とその遺体などを含めた可燃材料)の量の多少と堆積状態の適否が重要な関係を持つものと考え、各地の草地における燃料の量、含水率、垂直分布を調べ、更に実際に火入れを行なって燃焼状態、燃焼熱量などについて調査した。

(1) 燃料の着火(第1表): 各種燃料の着火温度はいずれも約 350℃ 以上であり、かつ着火温度($T^{\circ}\text{C}$)と着火までの時間(t^{sec})との間には

$$T^{3.7} t = K \text{ (一定)}$$

の関係が見られた。着火指数 K は燃焼の難易性を示すものであって、燃料の含水量の多少と、

水の蒸発の難易が関係し、着火指数の小さい枯シバなどは最も燃え易く、ススキおよびササの茎は燃え難い。

(2) 燃焼熱量：燃研式断熱々量計を使って、燃焼熱量を調べた結果、いずれの枯草も約 $4.600 \sim 4.500 \text{ cal/g}$ であって、枯草の種類による差異は少ない。従って火入れ時の全燃焼熱量は、直接に燃えた燃料の多少によるものと推察された。

(3) 燃料の量と堆積状態：火入れ時の燃料の量は草地の種類によって異なり、シバ型草地約 $0.2 \sim 0.7 \text{ Kg/m}^2$ 、ススキ型草地約 $0.3 \sim 2 \text{ Kg/m}^2$ 、ササ型草地約 $1.2 \sim 3 \text{ Kg/m}^2$ であった。燃料の堆積状態を見ると、積雪地の山地のススキ型草地では地面に倒れた「押倒し型」、平地では「立枯れ型」であった。またシバ型草地は「押倒し型」を、ササ型草地は「立枯れ型」を示した。

(4) 燃焼状態：燃焼には燃料の堆積の型と含水率が関係し、立枯れ型の燃料は含水率が約 50 % 以下の場合には、火入れによってよく燃えた。しかし押倒し型では含水率が約 30 % 以下にならないと火入れは困難であった。一般にススキ型およびササ型草地では、燃料の 90 % 以上を燃やすことができた。しかし押倒し型のシバ型草地の火入れでは、非常によく燃えた場合でも地表上約 1.4 ~ 2.1 cm 以下の層は燃え残り、全燃料の約 30 ~ 65 % 以上を燃やすことは困難であった。

3 火 入 れ 温 度

(1) 火入れ温度の変化(第1図)：シバ型、ススキ型およびササ型草地の火入れにともなう地上部各測点の温度変化は、それぞれ約 2 ~ 4、2 ~ 6 および 4 ~ 15 min 続いた。一般に燃えた燃料が多いほど、また延焼速度が遅いほど、温度変化は長く続いた。追風燃焼では地上部測定の位置が高くなるほど、その測点の最高温度に達する時刻が早く、向風燃焼ではその逆であった。また風向がたえず変わる場合には、温度変化曲線に幾つもの山(peak temperature)が出現した。

(2) 最高温度の垂直分布(第2図)：最高温度の垂直分布は基本的には「押倒し型」と「立枯れ型」に分けることができる。「押倒し型」は燃料が地面附近に集積しているか、立っている燃料でも地際附近で燃え切れた立茎が倒れてから燃える場合に見られるもので、最高温度の垂直分布は高さ 2 ~ 15 cm 附近に顕著な山ができる。「立枯れ型」は立枯れ状態にある燃料が立ったまま燃える場合に起こり、最高温度の垂直分布に大きな山のないのが特徴であった。

(3) 最高温度および高温の持続時間(第2表)：燃えた燃料が少ないシバ型草地の最高温度は

約200～500℃にすぎなかったが、ススキ型およびササ型草地では400～800℃に達した。一般に燃えた燃料が約0.5 Kg/m²までは、その量が多くなるほど最高温度は高くなったが、それ以上の量が燃えても最高温度が800℃を越えることはほとんどなかった。

また燃えた燃料の量が多くなるほど高温持続時間は長くなり、最高温度がほぼ同じであった。ススキ型とササ型草地を比較すると、ササ型草地の高温持続時間はススキ型草地の倍近い値を示した。

(4) 地表温および地温 (第8表) : 一般に燃えた燃料が多くなるほど地温は上昇し、三草地のうちではススキ型草地が最も高かった。しかしススキ型草地でも地表面の最高温度は50～190℃程度であり、地下2cmの地温は数℃、地下4cmでは0.5～1℃、火入れ前より上昇するにとどまった。一方、ササ型草地では堆積腐植物および枯葉枝が厚く地面をおもっており、それらの一部が燃え残り断熱効果を果すために、燃えた燃料が多いにもかかわらず、地面附近の地温はシバ型草地よりも低かった。

(5) 燃焼強度 (第4表) : 50～800℃の恒温炉内のシバの生長点が枯死する温度の2.5乗と枯死までの時間との積は、ほぼ一定の関係にあった。この関係が変温下でも成立つと仮定し、火入れ時における高温が植物の枯死に与える影響を加味した燃焼の強さの指標 (燃焼強度) を導いた。すなわち最も火力の強い地表上5cm前後の高さにおける火入れ温度 (T℃) が時間 (t sec) の変化に対し

$$T = f(t)$$

の関係にあるとすれば、

$$\text{燃焼強度} = \int_{t_1}^{t_2} [f(t)]^{2.5} dt$$

t₁: 火入れ温度が上昇し50℃を越える時刻

t₂: 火入れ温度が再び50℃に下る時刻

で表わした。この燃焼強度により、各草地の火入れが植物に与える火力の強さを比較すると、ススキ型草地に対し、シバ型草地では約 $\frac{1}{15} \sim \frac{1}{7}$ 倍、ササ型草地では約1.5～2倍であった。

第2部 火入れがススキの生育に与える影響

1 高温とススキの枯死

火入れとススキの生育に関する野外実験に先立ち、高温下におけるススキのシュートの枯死経過を観察した。

(1) 高温炉内の体温変化（第3図）：直径約8～10 mmのシュートを50～800℃の各温度に制御した炉内に挿入し、シュートの中心部の温度変化を測定した。炉内温度が約200℃以上の場合のシュートの体温は時間の経過とともに上昇を続け、100℃の温度に達するとしばらくその温度を保った。この100℃の温度でシュート内部の水分が全部蒸発すると、体温は急上昇し、炉内温度が約400℃以上の場合は、シュートは燃えた。シュートの体温が炉内温度と一致する時間は、炉内温度が低いほど著しく遅れ、炉内温度が300、100および50℃では、それぞれ約20 min、4 hrおよび48 hr 後であった。

(2) 高温炉内のシュートの枯死：100～800℃の恒温炉内でシュートが枯死する温度（ T ℃）と枯死までの時間（ t sec）とはほぼ

$$T^at = K \text{ (一定)}$$

の関係があり、勾配を示す a の値は1.8～2.5の範囲内にあり、細いシュートほど a は大きくなった。即ちシュートは細いものほど、炉内温度の上昇にともなう枯死時間の短縮が著しくなり、ススキの太さ12 mm、6 mmのシュートおよびシバは、100℃の温度ではそれぞれ約220、190および150 sec、600℃ではそれぞれ約9、4および2 secで枯死した。

(3) 火入れによるシュートの枯死部位（第4図）：ススキの周囲に0.3、1.0および1.5 Kg/m²の枯ススキを敷いて燃やしたところ、ススキは地下4 mmから地上7 mmより上に出ている部位が枯死した。この関係は土壌組成が相異してもほぼ同じ結果であり、燃えた燃料が多いほど、シュートの下部まで枯れた。しかしススキ型草地では、燃料の量が1 Kg/m²を越えることは稀であり、生長点（shoot apex）が地下にあるシュートは、火入れを受けても地上部を失うだけでやがて伸長生長することを示唆した。

2 火入れに関連し重要なススキの二、三の形質

火入れ温度の測定および上述の高温とシュートの枯死の観察は、火入れ時における生長点の位置が重要であることを示した。冬季のススキの生長点は地下約1.6～5.7 cmにあるが、5月中頃より地上に現われ、以後直線的に上昇した。生長点の高さと茎高（地面から最高位展開葉の葉鞘の先端までの高さ）との間には一次の関係式が成立し、生長点の高さは茎高から容易に推測可能であり、火入れや刈取り時期の目安が得られることを示した。

火入れによる地上部を失ったススキの再生には、地下器官内の貯蔵物質の量が重要である。ススキの地下茎を中心に各器官内の炭水化物含有率の調査を行なった結果、ススキ体内の炭水化物は6月下旬の節間伸長開始期にその量は最低になった。

その他各地におけるススキの茎高／草丈率、葉数変化などの調査を行ない、火入れ処理後のススキの再生現象考察の参考にした。

3 茎数および草丈（第5図）：火入れがススキに与える影響は、シュートの生長点が枯れるかどうかで大きく変わる。生長点が地下にある早春の火入れでは、初期生育が多少遅れるという形で生長した。4月末以降の火入れでは多くのシュートが枯死したが、その後、新分けつの発生という段階をへて再生長した。この場合、地下器官に充分貯蔵物質を持つ時期の火入れでは、枯死茎数の数倍の分けつを生じ、茎数は著しく増加した。しかし貯蔵物質をほとんど消費した6月中・下旬頃の火入れでは、分けつ数は減少した。一般に火入れ区では分けつの発生が著しい反面に、生育初期の草丈が低く、この傾向は火入れ時期が遅い区ほど顕著であった。

4 葉身その他：火入れ時期が遅い区では、①出穂期の遅延などに見られるように、ススキの生長が無火入れ区より2—3週間遅くまで続き、②体内含水率が5—10%多く、③再生した葉身の緑色は約60%濃くなり、④出葉速度が早まり、⑤地上部全重に占める相対的な葉身重が大きくなった。このようにして、火入れ処理後のススキは生育段階が若い状態に戻り、光合成能率を高め、速かに地上部の生長を回復し、越冬前には無火入れ区に劣らぬ含有率の炭水化物を地下器官に貯えるに至った。

5 地上部生産量（第6図）：枯死茎が出ない早春の火入れでは、地上部生産量は無火入れ区とほぼ同様に経過した。また枯死率が20—30%を越えないような4—5月の火入れでは、生育初期には無火入れ区より多少劣ったが、当年の晩秋までにはほぼ回復した。一方、地下茎内貯蔵物質がほぼ最低になる6月中・下旬頃の火入れでは、晩秋に至ってもその生産量は無火入れ区の $\frac{1}{2}$ 以下にとどまった。しかし翌年の秋までにはほぼ回復した。

以上、草地型などによる火入れ温度変化の違いを指摘し、火入れがススキの生育に与える影響を明らかにした。

第1表 ススキ、シバ、ササの各器官およびその含水率(%)と着火指数

ス ス キ			コ ウ ラ イ シ バ			チ マ キ ザ サ		
	含水率	着 火 指 数		含水率	着 火 指 数		含水率	着 火 指 数
生 茎	90	200×10^{10}	枯 シ バ	32	7×10^{10}	生 茎	45	100×10^{10}
生 葉 鞘	86	90 "	枯 シ バ	9	2.6 "	立 枯 茎	9	25 "
枯 茎	9	24 "				生 葉	48	9 "
生 葉 身	79	17 "				枯 葉	9	2 "
枯 葉 身	9	4 "						

第2表 各草地の地表上2～15cm附近の最高温度および高温持続時間

		シ バ 型	ス ス キ 型	サ サ 型
最 高 温 度 (°C)		200-500	400-800	400-800
高 温 持 続 時 間 (sec)	200°C以上	5-80	40-150	70-290
	400 "	0-17	10-100	15-200
	500 "	0-4	0-60	0-110

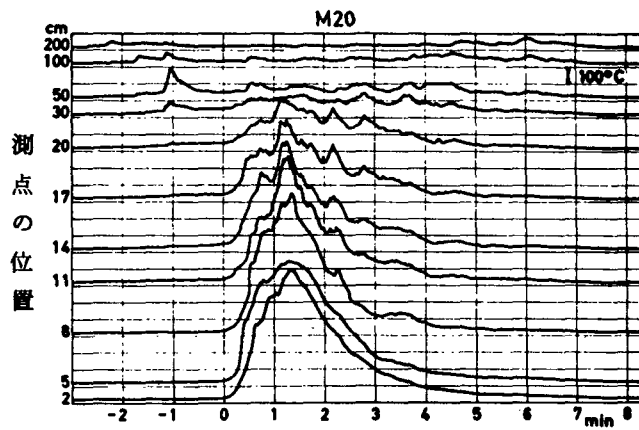
第3表 各草地における地表および地中の最高温度および上昇温度

	シ バ 型			ス ス キ 型			サ サ 型		
測温位置 (cm)	0	-2	-4	0	-2	-4	0	-2	-4
最高温度 (°C)	20-110	-	-	50-190	-	-	20-65	-	-
上昇温度 (°C)	10-100	0-3	0-0.5	25-170	3-7	0.5-1	6-48	0.5-5	0-2

第4表 各草地における燃焼強度

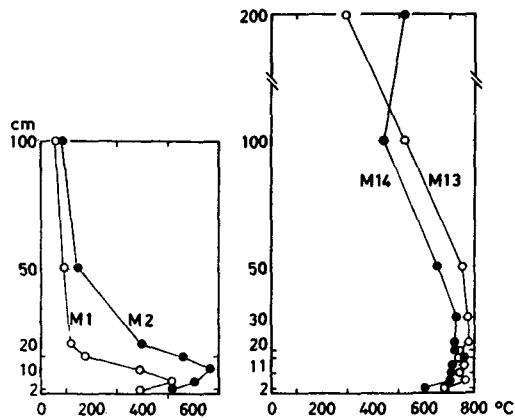
	燃えた燃料 (g/m^2)	燃焼強度 ($\times 10^6$)	備 考
シバ型	75-140	11-75	春の火入れ
	250-310	45-155	"
ススキ型	300-500	235-690	春の火入れ
	300-900	45-710	夏・秋の火入れ(除草剤散布)
ササ型	600-1,200	200-1,250	春の火入れ
	750-1,400	300-1,280	夏・秋の火入れ(除草剤散布)

注：シバやその他の植物葉は、 $> 14 \times 10^6$ の条件で枯死する。同様にススキの直径
 $6mm$ および $12mm$ のシュートはそれぞれ $> 20-30 \times 10^6$ および $> 30-50$
 $\times 10^6$ で、ササは $> 20-30 \times 10^6$ で枯死する。



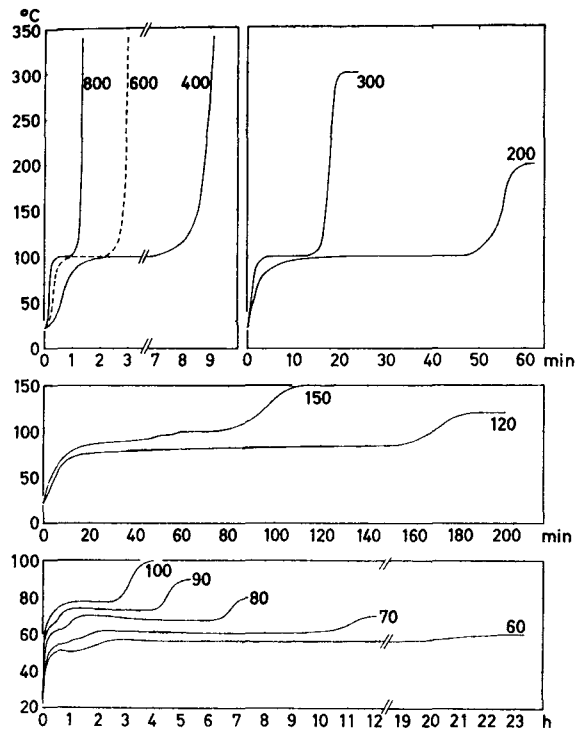
第1図 火入れ温度変化の1例

(ススキ型草地：燃えた燃料 0.8 Kg/m^2)



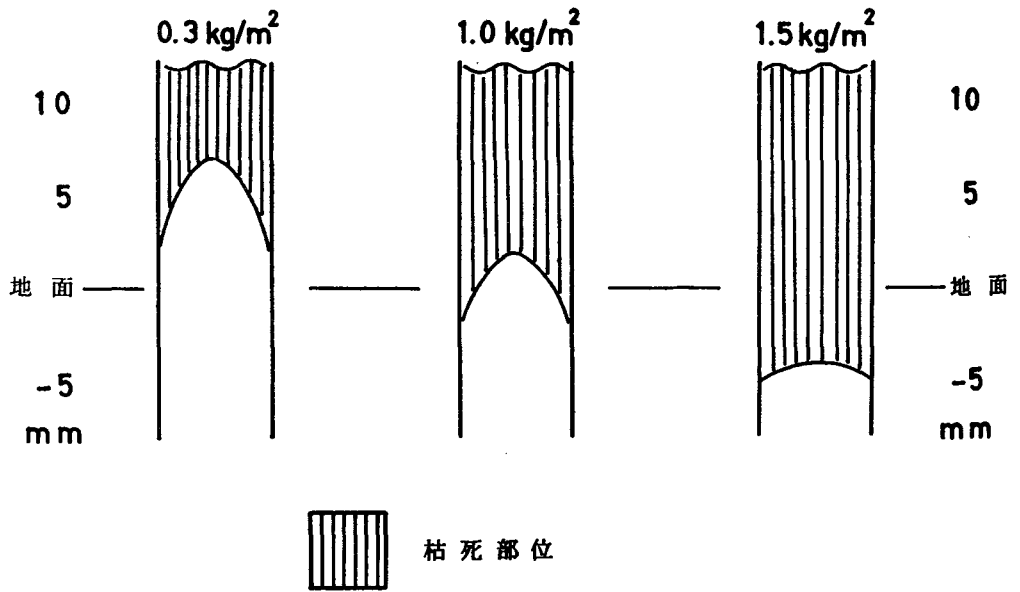
第2図 ススキ型草地の火入れにおける高さ別
最高温度分布の相異

(左：押倒し型、右：立枯型)

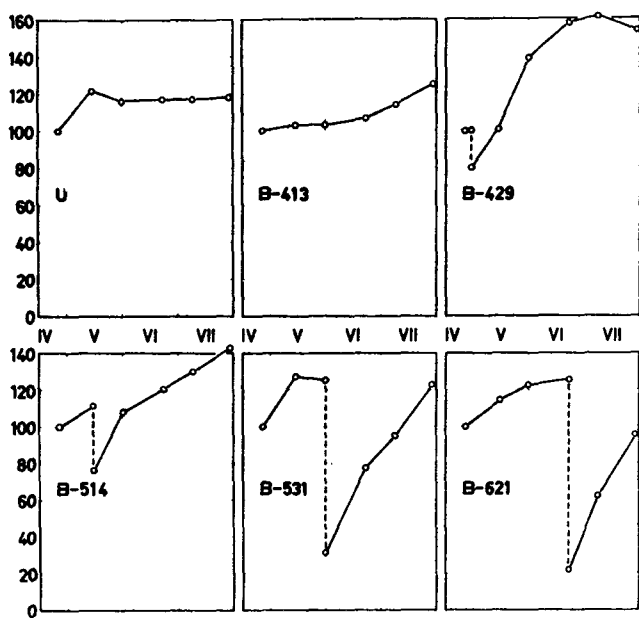


第3図 炉内の各温度下におけるシュートの体温の時間的变化

図中の数字は炉内の温度を示す。



第4図 燃料の多少 (0.3、1.0、1.5 kg/m²) とススキのシュート (基部直径12 mm) の枯死部位の関係



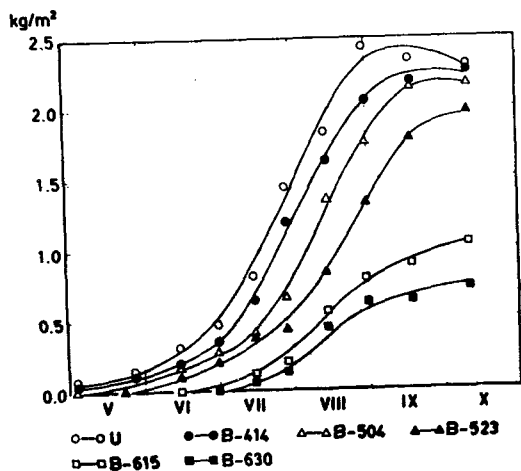
第5図 基数の季節的推移

……は火入れにより枯死したシュート数を示す。

U (無火入れ区) B-413 (4月13日火入れ)

B-429 (4月29日火入れ) B-514 (5月14日火入れ)

B-531 (5月31日火入れ) B-621 (6月21日火入れ)



第6図 地上部乾物量の季節的推移

審 査 結 果 の 要 旨

火入れは自然草地の維持管理上、必要な作業として古くから行なわれているが、火入れ温度の測定には技術的に困難な点が多く、そのため諸外国においても火入れ温度の実態については殆んど明らかにされていない。本研究は、従来の測温法および記録方法を改良して、地下10cmから地上2mまでの10数ヶ所の温度変化を同時観測し、1秒間隔で記録することに成功し、これを用いてシバ・ススキ・ササ草地の火入れ温度を観測し、これら50数例の観測結果から草地の燃焼の実態を明らかにし、さらにススキの生育・再生に及ぼす火入れの影響を調べて、草地における火入れの効果を考察したものである。

まず、草地における燃料の燃焼条件を明らかにするために、高温炉を用いてササ・ススキ・シバの着火および発火温度と時間を検討し、燃焼の難易には燃料の含水量の多少と水の蒸発の難易が関係するが、枯草では何れの種類でも着火温度・最低発火温度・燃焼熱量に大差がなく、燃焼性は略々同じであった。実際の草地における燃焼の難易には、さらに燃料の堆積状態が関係し、「立枯れ型」を示す草地は火入れが容易であって、燃料の含水率50%以下でよく燃えたが、「押倒し型」の草地では含水率30%以下で始めて火入れは可能となり、かつ多量の燃料が燃え残った。また、除草剤散布は、生草の多い夏秋時の火入れに有効であることを実証した。

火入れに伴う温度変化については、各測点の温度変化の継続時間・最高温度の垂直分布・延焼速度・風の方向などの面から検討した結果、草地の燃焼状態は明らかに地上部の温度に対応して変化することが認められた。即ち、地上部各測点の温度変化には燃焼量と延焼速度が関係するが、その変化は2～15分で終了すること、最高温度の垂直分布は、燃料の堆積状態で異なり、「押倒し型」の場合に限り、地上2～15cm附近にピークがみられること、火入れ温度は燃焼量に比例して上昇するが、最高温度限界は800度前後であること、燃焼量が増えると高温持続時間が長くなること、向風燃焼は追風燃焼に比べて高温持続時間が長く、有利であることなどの諸点が明らかにされた。地温については、ススキ草地の火入れの場合でも地表面温度が50～190度であるのに比べて地下2cm附近の上昇は数度に過ぎないことから、地中環境に与える火入れの影響は軽微であることが推定された。

また、火入れの効果については、ススキの再生量と品質が火入れ時期によって異なることを認め、その生理生態的理由を明らかにして、火入れ時期に対する理論的根拠を与えた。

以上、本研究は草地における火入れ温度の全貌と燃焼の実態を明らかにしたものであるが、多くの新知見を含み、草地学・農業気象学並びに草地の維持管理の合理的改善に対して寄与する所が大きい。よって著者は農学博士の資格に値するものと判定した。