7. 結 び

前に發表した論文に於て多少なりとも疑問視されさうな所を詳細に論議し結論としては外部電流の位置は前と同様 E 又は F_1 層と見做してよいと云ふ事になつた。此の點に關しては京大長谷川教授より直接間接に御教示戴いた事に對し衷心より感謝の意を表したい。

尙本論文の完成を御許し下さつた花島所長にも謝意を表す次第である。

昭和 17 年暮 (1942) 中央航空研究所にて

芝 生 に 於 ける 燃 焼 の 傳 播*

藏 重 一 彦

1. 芝生の状況、調査方法

今夏測候所構内の夏枯の芝生を全部刈上げた。芝生は「道芝」と稱する種類のものである。その爲刈跡の草の丈は略、3 匁乃至 4 匁に平均された。切株の数は 10 匁平方に平均 15 株位あつて切株の間の地面は枯葉で覆はれてゐた。枯葉の長さは 2 匁内外のものが最も多く幅は 1 匁乃至 2 匁の程度である。實驗當時は切株から 2 匁内外の新芽が出てゐたがこの芝生面は非常に燃え易かつたが 8 月下旬になつて芽が伸びた頃には燃え難くなつた。8 月上旬この状態の芝生で燃焼傳播の實驗を數回行つた。實驗の方法は先づ芝生面に繩を以つて 1.5 米角の方眼を作り、火尖の傳播速度、燃え跡の形狀の調査に便した。尙高處より寫眞機を以つて一定時間間隔で現場を撮影し、得た印畫の斜寫眞を平面圖に描寫し直した。一方現場で連續的に見取圖を作製した。又地面の風向を見る爲に高さ 30 匁程の棒を諸所に立てて夫に眞綿片を附した。風速は地上 30 匁の値を微風計で測定し、又アスマン通風寒暖計を用ひて矢張り同じ高さの氣温と濕度とを測定した。

2. 點源の場合〔實驗 (1)〕

以上の準備をした上で、芝生に設けた繩の方眼の風上に近いものゝ中央に枯草の小團塊を置いて點火すると火は四方に向つて芝生を黒く焼いて行く。火尖の速さは風下へ 1 分間に平均 80 匁位時には 1 米を越える。この時の火尖の形狀を先づ調べて見る。

(イ) 火尖の形狀

第 1 圖に斜寫眞を平面圖に描き直して得た、點火後 1 分毎の火尖の位置を示した。圖を見ると點火直後から數分間は割合に滑な橢圓形を示してゐるが、時間が経過するにつれ地表の風向に従つ

* K. Kurasige: Propagation of Fire Front on a Lawn.

て風下に向つて二分して行く傾向が見える。又小さな障害物の爲——後から調べると土龍の盛上げた跡等で、僅か數厘の高さの差が障害となつてゐる事に氣付いた——火災が凹入した場所が所々見える。圖の下方は北の方向に當り、測候所の土堤となつて居り夫に火尖が這ひ上つた爲形狀が著しく崩れたものである。

第 1 圖 點源からの火尖の傳播

+ 印は火元、方眼は 1.5 米平方、矢印は地上 30 厘の風向、數字は分時を示す、斜線部は燃え残り。

第 2 圖

實線は實測、點線は計算。

之等の不規則を平滑して見ると第 2 圖の如くなる。圖に見る如く 1 分後より 4 分後までの火尖の圖形は可成正しい楕圓であり、その長軸は風向に平行してゐる。圖上に於いて長軸、短軸、離心率、焦點距離を算出すると第 1 表の如くなる。

尙第 2 圖には點線を以つて第 1 表に與へられた長軸、短軸から計算した楕圓を示した。實際の

第 1 表

分	長 軸 (a)	短 軸 (b)	離 心 率 e	$a \times e$
1	0.633 米	0.53 米	0.55 米	0.35 米
2	1.43	1.08	0.66	0.94
3	2.12	1.69	0.69	1.46
4	2.96	2.25	0.65	1.92
5	3.84	3.00	0.62	2.38

ものと初めの中は一致してゐるが、時間を経るに従ひ實際の方が風上に尖つた卵形となつて行くのが判る。

無風の時の火尖の傳播速度を V 、風速を W とし對流の爲の氣流は風向に直角でその大さは風速に比例するものとして CW で示すと、この場合延焼の形は中心が次第に風下に移つて行く楕圓となり、

$$\frac{(x-WT)^2}{(VT)^2} + \frac{y^2}{(VT-CW)^2} = 1 \quad (1)$$

で示される。ここで T は時間を示す。

この時楕圓の離心率は $e = \frac{\sqrt{2CVW - C^2W^2}}{V}$ で常數だが、焦點距離は $ae = T\sqrt{2CVW - C^2W^2}$ で時間に比例する。

第 1 表から見る如く e は略々一定で 0.6 内外だが ae は第 3 圖に示す如く、時間に比例して大きくなつて行く。

第 3 圖 焦點距離の時間的變化

第 4 圖 楕圓中心の移動

又この理論によると楕圓の中心の風下への移動の速さは風速と一致する事になる。第 4 圖に楕圓中心の風下への移動の狀況を示したが、之を見ると時間に對して直線的に變つて行くのが判る。移動速度は毎分平均 45 糎でその大さは地上 30 糎の高さの風速の 60 分の 1 位である。之等の事項は前記の理論が實際に於いて大體満足される事を示すものと考へられる。

(ロ) 燃焼面積の時間變化

1 分毎の燃焼面積を調べると第 2 表の如くなる。

第 2 表

分	1	2	3	4	5	6	7
面積 (米) ²	0.52	2.77	6.01	11.70	15.67	22.22	34.17

(1) 文獻 1.

之を圖示したものが第 5 圖で可成美しい二次曲線になる。實驗式を求めて見ると面積を S 、時間を T で示せば

$$S = 0.5 T^{2.15}$$

となり拋物線に近い 面積が T^2 に比例するものとして焼跡が圓形だとすると火尖の傳はる速度は常數となつて毎分 40 粒位になる。實際には風上及び風向に直角の方向へは傳播速度は常數に近いが、風下へは時間と共に大きくなるらしい。

(ハ) 火尖の傳播速度

(1) 平均傳播速度. 火元を中心とし風上を 0° 、風下を 180° とし時計廻りに 45° 毎の方向の傳播速度の平均を求めると次表の如くなる。

第 3 表

方 向	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
平均速度 1 分間粒	27.0	36.6	63.0	68.9	81.5	73.9	57.0	38.6

即ち風下への傳播速度は風上への傳播速度の 3 倍に達する。風向へ直角の方向へは左右とも略、對稱形に分布する。

(2) 傳播速度の時間的變化. 第 6 圖に示す如く、風上側では傳播速度は時間的に餘り變化せぬが、風下側では第 7 圖に示す如く時間の経過と共にデグザグな變化をし乍ら増して行く。結局は

第 6 圖 風上側の傳播速度の變化
實驗 (1)

第 7 圖 風下側の傳播速度の變化

或一定値に接近する傾向がある。圖には三個の例を示したが傾向は同様である。平均的に見て初めの間は時間の経過に比例して速度が増す、例へば

$$\text{(實驗 4) に対して} \quad V = 0.08 T^{0.973}$$

$$\text{(實驗 5) に対して} \quad V = 0.2 T^{0.801}$$

の如くなる。

(3) 傳播速度の平面的分布. 傳播速度の平面的分布を調べる爲焼け跡の平面圖上に等傳播速度線とも云ふべきものを記入して見ると諸所に速度の大きい場所があるのに氣付く。夫等は火元を中心

とする同心圓狀に分布してゐて之等の中に比較的速度の緩い部分が挟まれて恰も縞の様な状況に竝んでゐる。同様な現象は發火點を線狀とした實驗の場合にも見られる。この現象は恐らく細い風の息によるものと想像される。實際實驗中に風が頬を過ぎて通るのを感じると共に火尖の進行が速くなる事が經驗された。

3. 溝中の傳播〔實驗(2)の後半〕

芝生に地上風向と竝行に厚板を2枚、1米の間隔を置いて竝べる。板と芝生との隙は土砂で埋める。この溝中に0.5米毎に繩の小片を竝べ、火尖の位置は30秒毎に記録した。風上の一點からの火の傳播の様子は第8圖の如くなる。即ち火尖は火元から扇狀に溝の中を擴つて行く。溝の兩縁に向つては略、直角に進む。溝中の速度の分布は恰も管路中の水の流れの如く、中心部に最大速度の所があり兩側程速度が緩い。又障害物の後方では特に緩くなる。その状況は第8圖の左側に示してある。

第8圖 風向に竝行な溝中の傳播(右)
と速度分布(左)
速度は毎分、粉

第9圖 風向に斜な溝中の傳播(右)
と速度分布(左)
速度は毎分、粉

4. 線源の場合〔實驗(2)及(3)〕

前述の如く芝生上に厚板で作つた溝の風上端に直線狀の火元を枯草で作つて點火し、直線狀の火尖を作る。

(イ) 火尖の傳播速度

溝の幅が一定である時は第9圖の如く火尖は進んで行く。傳播速度は略、一定であるが、速度分布圖を作つて細く觀察すると前節の記述の如く速度の大きい所と小さい所とが交互に縞をなして竝んでゐるのが判る。燃焼の幅に變化がある例は第8圖下半に見られる。この例では燃焼の幅の狭

い所は速度速く、幅の廣い所では速度が緩く、幅と速度の積が略、一定に保たれてゐる。この結果は木暮氏⁽¹⁾其他の記述と一致する。

(ロ) 溝中に障害物ある場合

次に前述の溝中に砂を以つて小堤を設け、その中央を幅 20 厘丈缺き取る。この障害物を通り抜ける時の火尖の傳播状況を調べる。

先づ溝が風向に對して斜の場合(第 9 圖)には火尖は障害物の所まで直線の前線を以つて進むが、障害物に突き當ると風下へ廻り込み、その一部が障害物を通り抜けるが、その部分も亦風下に廻り込むので燃焼は障害物の背後で止つて仕舞ふ。その後障害物の空所に點火して見ても前と同じ状況を繰返す丈で火は燃え進まない。

一方溝が風向に竝行の場合(第 8 圖)には火尖は直進的にその先頭を以つて障害物の空所を通り抜け、夫と同時に俄然溝一杯に擴大して燃え擴つて行く。

障害物を通り抜ける時の火尖の速度は第 10 圖に見る如く、一時的に緩慢となるが夫を通り抜けると再び大きくなる様な傾向がある。この點は前述の木暮氏⁽²⁾其他の紙を材料とした燃焼の實驗と一致せぬ。同氏等の實驗では障害物を通る際火尖の速度は一時的に増大すると述べられてゐる。尙第 10 圖の實驗(2)に示す如く障害物通過後は風下に向つて傳播速度は次第に増加し乍ら一定値に近づく様に見える。

第 10 圖 障害物を通り抜ける時の傳播速度の變化

第 11 圖 複雑な地形に於ける傳播の状況。

5. 稍、複雑な地形の場合〔實驗(4)〕

芝生面に第 11 圖の如き障害物を作る。A の部分は高さ 30 厘の厚板を立てて圍んだ部分で、B の部分は二本の圓筒を直角に置いてある。火元に點火すると火尖は圖の如く擴つて行く。障害物がある爲火尖は概觀して三個の枝に分れて行く。分枝「イ」は風下に流れて AB 間の通路に入り込むが、點火より 4 分後には止つて仕舞ふ。風向と通路が斜交してゐる爲である。分枝「ロ」は最初風

(1), (2) 文獻 2.

下に向ふが、障害物 A に突き當ると、向きを變へて障害物に沿つて風下に極めて緩りと毎分 45 乃至 50 糎の速度で進み遂に止つて仕舞ふ。分枝「ハ」は、B の障害物を右へ避けて通過すると共に急速に風下に進む。その左側の部分は障害物の背後に廻り込み、遂に障害物に平行して止る。斯くの如く風向に斜交する通路には火は進み難い事が判る。

6. 火炎の傳播の狀況

芝生の焼跡を調べて見ると芝草の葉の部分は燃えて無くなつて居り、莖の部分丈が上部が焦げて残つて居る。株と株の間の地面に敷かれた枯葉は表面にある一通り丈が焦げて下側の部分は焼けて居ぬ。焼け止りの部分を見ると黒焦げの部分と未だ焼けぬ部分との間に茶褐色に變色した部分が介在してゐる。變色した部分を更に細く見ると第 12 圖に示す如く外側（焼けぬ方に向つて）の方は

第 12 圖 焼け止りの狀況
斜線は焦げた部分、破線は炎の足の想像の位置。

草の高い所——地上から 2 糎位から上方——が焦げて居り、内方に向つて焦げた部分が低くなつて行き遂に地表の枯葉が焦げる様になつてゐる。變色した部分は概略 15 糎の幅がある。是から推察すると炎は爪先上りになつて芝生を進んで行き、炎の先頭と最後部とは 15 糎の距離があるものと考へられる。

實驗 (4) の場合に實際炎の傳る處を調べて見ると次の様な狀況になつてゐる事が判つた。

- (1) 炎が進んで行く時先づ芝の葉先の高い所に火が着き、夫から低い方に燃え下つて行く。夫故炎の進んで行く前方では芝草の高い部分が燃えて居り、後方に行く程低い所が燃えてゐて、前記の推測通りである事が判つた。炎の先頭と後尾の枯草の燃えてゐる部分との幅はこの例では 7 糎であつた。
- (2) 炎の先は風下へ傾いて居り、個々の炎の高さは 6 乃至 9 糎である。
- (3) 炎の帯は一本、一本の草の一つづつ立つてゐる炎の集合であり、この帯が全體として風下へ進んで行く。
- (4) 炎が一つの葉から他の葉へ移る時は爆發的にボツと燃え上る。

次に一本の芝草の葉の一端に點火して、夫の燃焼する時間を調べて見た。その結果は第 13 圖に

示す。即ち長さ 4 匁以下の草の葉が燃えきる時間は 6 秒内外であるが 4 匁以上に葉が長くなると燃焼時間は葉の長さ按比例して長くなる。點火の瞬間には爆發的に火が傳るので短い葉程燃焼時間が短い、が點火後少時らくすると傳り方が緩漫となり略一定速度で燃えて行くので葉が長くなると燃焼時間と葉の長さとの直線的關係になる。

そこで 2~3 匁の芝草の葉が燃えるに要する時間を 6 秒と見積る。一方火尖の傳播速度を毎分 80~150 匁即ち毎秒 1.3~2.5 匁とする。すると一本の草が燃え了る間に火尖は $1.3 \times 6 \sim 2.5 \times 6$ 匁即ち 8~15 匁進む事になる。

之丈の幅を炎が占めてゐる事になる。之を以つて前記第 12 圖の状況を説明し得ると考へる。

又この火陣の幅は燃焼の傳播速度が大きければ廣くなるものと推察される。火陣の幅の大小は對流の強さに影響するものと考へられるので、夫によつて逆に傳播速度が影響を受ける事になるのではないかと考へられる。

實 驗 表

番 號	日 時	天 氣	風		氣 溫	濕 度	備 考
			風 力 臺	地 上			
1	省 略	曇	NNE 4.0	— —	27.9	61	第 1 圖
2		快 晴	NE 2.7	— 0.82	28.8	73	第 8 圖
3		快 晴	NNE 3.0	— 0.63	28.6	73	第 9 圖
4		快 晴	SE 4.0	SSE 0.68	28.4	79	第 11 圖
5		快 晴	ESE 5.0	ENE 1.26	28.9	62	圖なし

終りにこの拙文の發表について御聲援下された畠山久尙博士に厚く御禮申し上げます。(以上)

文 獻

1. 「火災に於ける延焼速度」消防研究叢書第一編第 36 頁。
2. 「科學」昭和 16 年 10 月號。