27. 樹木の防火機能に関する研究

—樹葉の耐火限界—

岩 河 信 文*

Fire Preventive Function of Trees —Critical Radiation to Auto-Ignition of Leaves—

Nobufumi IWAKAWA

摘要：樹木の防火機能に関する研究の一環として、樹木の耐火力評価の尺度となる「限界値」を実験により求めた。実験は、材料耐火性試験装置を用い、樹葉が自然発火に至る輻射熱量と発火に至るまでの性状および時間を観測している。成果は、常緑広葉樹、落葉広葉樹、針葉樹の別に、安全性を見込んだ耐火限界値として導いた。

1. 実験目的

樹木の発火に要する輻射熱量は、樹木の耐火力¹⁾評価の尺度として重要な要素であり、詳細な究明が必要とされる。しかるに、これまでの研究では適切な装置もなく、また、実大火災実験の機会もなかったことから、その実験の例を聞かない。

筆者はこれまで生きた樹木を試験体とし、室内輻射炉および野外実大実験により発火限界値を計測した。しかし、この種の実験は、その機会が限られるため、数多く

実施することができないという問題がある。樹種間の耐火力の強弱を判定したり、樹木としての平均的な耐火力を導くためには、より多くの試験体を用いて確かめることが必要なのである。

本実験は、新たに開発された材料発火性試験装置（ISO/TC92による Technical Report 3814²⁾提案装置と同等品）を用い、上記問題を解決するため多数の樹葉を試験体として、その自然発火に要する輻射熱量を求めたものである。

図一 1 発火性試験装置の概要

* 建設省建築研究所

2. 実験方法

使用した装置は、ISO/TC92—TR 3814 提案のものと同等品を出いた。装置の概要を図—1に示す。図にみられるように、高さ47cmの四本の柱に支えられた試料台の上方に4kwのHeat Tubeが螺旋状に入ったラジエータが置かれ、この電源を電圧を調節することによって変化させ、試料の発火性状を観察するものである。

試験体である樹葉は熱を受けると折れ曲り、熱源との位置関係が狂う結果、設定した受熱量が変わってしまう恐れがある。そのため、図のごとき試料ホルダーとしての金網を製作し、網の間に樹葉を挟み固定することにした。網は0.1mm径のステンレス製であるので、網からの熱の伝達量は無視できると考えた。

輻射熱量の測定は、輻射計（東京精工RⅢ型水冷式）を用い、装置の電圧操作と発生熱量との関係をあらかじめ予備実験により確かめた（図—2）。以後の実験においては必要な熱量の設定は、この図を基に装置の電圧調整により調整した。

図—2 電圧と輻射熱量との関係

実験は、各樹種とも20,100, 17,400, 17,490, 12,600 kcal/m²h…の順に熱量を設定し、各熱量につき同一種当たり12回の実験を1セットとした。ただし、当該熱量で連続3回発火のないときは「発火なし」とみなし、更に順次400 kcal/m²hづつ上位の値について試み、発火の限界を確認するまで続けた。

熱量の変更に際しては、新たな熱量を発生すべき電圧に操作後安定するまでに15分ほどを要することから、安全をみて、変更後30分放置した後、熱電対による試料台上方2cmの温度を測定し、定常状態にあることを確認したのち、実験を再開した（図—3）。

図—3 炉の安定性試験

試験体としての樹葉は、実験当日建築研究所（茨城県筑波郡大穂町立原1）およびその周辺より採集したもので、炉にかけるまでビニール袋に入れて管理した。

観察は、発火までの樹葉の変化と時間および発火の場所を主体とした。なお、試供樹葉の規格（長さ、巾、重量）を計測するとともに、自動面積計（林電工製AAM—7型）によって、その面積も計測した。また、水分計（Kett FD—310型）により含水率を測定した。発火までの時間はストップウォッチにより計測した。各樹種とも発火時間（単位：秒）については、各熱量毎に測定した12例の結果のうち最高、最低の値を捨てた10例の平均値を求めている。

実験室（建築研究所耐火実験棟内）の温度および湿度は、各熱量についての実験毎にその前後の値を記録した。なお、風については、測定の対象が輻射熱であることのほか、室内であることと、使用した装量が特に風防の壁付であることから無風として扱った。

3. 実験結果

表—1は、各受熱量における樹種別の発火時間を示す。表中×印は、その熱量では発火のないことを示している。表から導かれる樹木の耐火限界値は次のとおりである。

なお、この限界値については、本実験やこれまでの筆者の一連の実験からみて、樹種間の差がみられるため、防火樹の等級区分として示すことは可能である。しかし受熱量が、20,000 kcal/m²hにもなると、耐火時間の差も数秒という程度であり、都市防火上は大きな意味を持たないと考えられる。常緑および落葉広葉樹と針葉樹という区分について、各々の限界値と燃え方の特色を把握していれば、周辺市街地との関連から、安全域と危険域の判定は可能である。

(1) 常緑広葉樹

試供樹種数17に関し、462回の加熱試験の結果、輻射受熱限界値として14,900～12,300 kcal/m²hを得た。この標本平均は13.87 × 10³ kcal/m²h（標本標準偏差0.7990）

表一 1 輻射受熱発火限界と発火時間

(単位: 秒)

R($\times 10^3$ Kcal/m ² h)	20.1	17.9	17.4	17.0	16.6	16.1	15.7	15.3	14.9	14.5	14.1	13.7	13.4	13.0	12.6	12.3	11.9	11.6	摘 要
樹種																			
常緑広葉樹																			
サザンカ	34		56						265	×									n=17
トベラ	26		82						85	×									$\bar{R} = 13.87$
モチノキ	26		33						52	×	×								s = 0.7990
ヤツデ	23		73						×	253	×								
トウネズミモチ	29		38						79	178	×								推定値
ゴムノキ	42		59						68		355	×							p=0.05
ヤマツバキ	42		69						207	288	290	×							$\mu = 13.87$
イヌツゲ	22		24						29		41	×			×				± 0.424
キズタ	17		19						22	×	22	×	×						限界値
クスノキ	15		18						22			190	×						< 13.45 >
ヤマモモ	16		20						122	188	164	177	×						($\times 10^3$ kcal / m ² h)
アオキ	20		26						32	×	34	38	×						
シラカシ	20		33						118		124		×			×			
サンゴジユ	30		45						73		166	306	315	×					
スダジイ	19		21						29				32		139	×			
マサキ	21		26						31		49		46		38	×	×		
マテバシイ	22		31						56		114	194	239		349	439	×		
落葉広葉樹																			
コナラ	14		27					98	×										n=8
エンジュ	14		25					53	123	×									$\bar{R} = 14.46$
ユリノキ	22		51						83	×									s = 0.5951
トウカエデ	14		17						40	44	×								推定値
ソメイヨシノ	14		20						50	23	×	×			×				$\mu = 14.46$
モミジバズカケノキ	14		30						48	71	139	×							± 0.532
イチヨウ	18		22						112		106	×			×				限界値
ケヤキ	13		16						28		46	122	122	×	×				< 13.93 >
針葉樹																			
イヌマキ	32		125			122	×		×	×									n=6
スギ	70		104			×		161	177	×	×								$\bar{R} = 13.90$
アカマツ	37		45						58	×	×								s = 1.6334
ヒマラヤシダ	74		69						164	121	136	131	156	145	×				推定値
ヒノキ	28	32		43	41	49		76		104			114		210	×			$\mu = 13.90$
カイズカイブキ	66		81						111						143		155	×	± 1.878
																			限界値
																			< 12.02 >

註: ×印は発火なしを示す。

である。安全を考慮して平均から標準偏差を引いた値を限界値とする考えもあるが、ここでは、t 分布を用い、母平均 μ を推定して用いた。

$\bar{R}$: 標本平均, s : 標本標準偏差, n : 標本数とすると、母平均 μ は次式から求めることができる。

$$\mu = \bar{R} - t \cdot \frac{s}{\sqrt{n-1}} \quad (1)$$

常緑広葉樹では、 $n=17$, $\bar{R}=13.87$, $s=0.7990$ であり、95%の確率で考えると、 $t=\pm 2.120$ となる。

これより 母平均 $\mu = 13.87 \pm 0.424$ を得る。

したがって、安全を考え $\mu_j = 13.87 - 0.424 \div 13.45$ を耐大限界値と考える。

(2) 落葉広葉樹

試料樹種数 8 に関し、200 回の加熱試験の結果得られた限界値は $15,300 \sim 13,400 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ である。ここで $\bar{R}$ および s を求めると $\bar{R} = 14.46 \times 10^3 \text{ kcal/m}^2\text{h}$, $s = 0.5951$

したがって、95%の確率で $t = 2.365$ から(1)式より

$$\mu = 14.46 \pm 0.532$$

安全を考え $\mu_r = 14.46 - 0.532 \div 13.93$ が限界値となる。

(3) 針葉樹

試料樹種数 6 に関し、128 回の加熱試験の結果得られた限界値は $16,100 \sim 11,900 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ である。

ここで、 $\bar{R} = 13.90 \times 10^3 \text{ kcal/m}^2\text{h}$, $s = 1.6334$

したがって、95%の確率で $t = 2.571$ から(1)式より

$$\mu = 13.90 \pm 1.878$$

更に、安全を考えると $\mu_s = 13.90 - 1.878 = 12.02$ が限界値となる。

以上から樹葉の輻射受熱による発火限界値（自然発火）を整理すること

表一 2 樹葉の発火限界値（自然発火—無災）

常緑広葉樹	13,450 kcal/m ² h
落葉広葉樹	13,930 kcal/m ² h
針 葉 樹	12,020 kcal/m ² h

が結論として導かれる値と考えられる。

なお、針葉樹には落葉もあるが、ここでは常緑のみを扱っている。

次に、表一 1 を基にして、受熱量と発火時間との関係をグラフに示すと図一 4～6 の通りである。時間 t は、常緑広葉樹では $R = 13.45$ で無限大となる。以下、落葉広葉樹は 13.93、針葉樹は 12.02 が $t \rightarrow \infty$ となる限界である。グラフの上半分は危険域、下半分は安全域を意味する。

図一 4 常緑広葉樹の発火限界曲線

図一 5 落葉広葉樹の発火限界曲線

図一 6 針葉樹の発火限界曲線

表－3 試験体の規格と発火性状

樹種	項目	含水率 (%)	面積 (cm ²)	重量 (g)	変形 (秒)	変色 (秒)	蒸気発生 (秒)	発火部位	摘 要
常緑広葉樹									
	サザンカ	68.8	14.26	0.52	19	27	28－69	面	小規模な爆裂多し、主脈左右膨脹大
	トベラ	66.6	12.50	0.66	3	20	26－57	主脈	爆裂と膨脹はげしい。
	モチノキ	58.3	9.72	0.33	12	24	25－58	面	膨脹大きく透明化、蒸気圧大
	ヤツデ	67.7	558.96	20.24	ナシ	40	41－115	面	小規模な爆裂多し
	トウネズミモチ	66.7	29.34	1.12	16	29	31－79	主脈	爆裂の範囲大規模
	ゴムノキ	75.0	172.72	10.21	35	63	65－85	面	主脈から水を吹く
	ヤマツバキ	58.4	11.33	0.40	7	26	26－74	葉脈	爆裂、小孔が表面に出来る
	イヌツゲ	67.1	3.50	0.10	41	25	26－	面	爆裂はげしい、葉全体が膨脹
	キズタ	79.1	79.33	1.20	8	15	16－45	面	葉の周縁が膨脹
	クスノキ	69.1	32.01	0.70	7	17	18－51	面	変色と同時に膨脹、爆裂
	ヤマモモ	54.3	18.80	0.51	12	16	17－60	面	主脈の左右膨脹、透明化して発火
	アオキ	75.5	107.71	3.33	15	23	23－75	面	極めて湿った爆発音
	シラカシ	47.5	13.74	0.29	35	18	12－73	面	爆裂なし
	サンゴジュ	70.5	41.12	1.70	25	13	26－75	主脈	蒸発音の途絶えた直後、変形、曲折
	スダジイ	55.1	20.01	0.57	9	18	20－66	面	全面膨脹、透明化して発火
	マサキ	64.1	10.37	0.27	13	22	23－60	面	爆裂部分が主脈にまたがる。透明化
	マテバシイ	44.9	58.08	1.71	43	35	15－75	主脈	裂け目が出来ると発火なし
落葉広葉樹									
	コナラ	55.3	46.82	0.76	5	8	8－40	葉脈	
	エンジュ	67.8	14.96	0.12	3	10	11－40	面	気胞多数
	ユリノキ	74.7	122.77	1.95	6	11	12－45	葉脈	
	トウカエデ	57.7	11.33	0.16	5	9	10－30	葉脈	三本の葉脈がほぼ同時に発火
	ソメイヨシノ	63.4	24.22	0.40	5	11	12－45	面	爆裂なし、全体に動き少ない
	モミジウスカケノキ	73.1	259.62	3.80	6	12	13－60	面と葉脈	
	イチヨウ	81.3	34.71	0.90	8	16	16－50	面	周縁部膨脹、その谷間から発火
	ケヤキ	57.7	14.13	0.22	4	9	10－33	面と葉脈	膨脹広範囲
針葉樹									
	イヌマキ	60.3	14.22	0.49	14	17	17－63	葉脈	爆裂あり
	スギ	62.0	—	—	ナシ	38	38－	—	小規模な爆裂つづく
	アカマツ	58.2	—	—	7	27	27－90	—	
	ヒマラヤシダー	61.0	—	—	ナシ	48	48－	—	
	ヒノキ	57.3	—	—	20	26	28－112	—	爆裂は小規模だが多数
	カイヅカイブキ	51.5	—	—	42	55	65－260	—	動き激しく、しかも長時間に亘る

備考：1. 変形、変色は天々点火後の開始時刻を示す（単位：秒）

2. 針葉樹の面積、重量は未測定。

表一3は、発火部位および発火までの特色に併せ、実験に供した樹葉を採取した同じ樹木から計量のために同時に採集した試料の含水率、面積、重量を示した。

なお、これまで示した実験結果において、落葉樹については、着葉期に關しての耐火力を示している。落葉期の枝幹のみによる耐火力については今後別途の実験の機会をつくり検討したい。

4. 考 察

室内の輻射炉による実験や野外実大実験では根のある生きた樹木を用いるため費用および時間の制約から、試料の数が限られ、実験例が少なくなる傾向がある。実験は出来得る限り数多く行い、データの精微化を図ることが大切である。樹葉を対象にした実験は、前述の問題点を補うとともに、樹木全般としてはやや不明確ながらも、細部については、より詳細な計測が可能になるという利点をもっている。

本実験では、樹葉をその対象とした結果、合計921回の加熱テストを行うことができた。表一1としては、これまで究明されなかった耐火限界値について凡その傾向を把握できたものと思われる。

試料採取からテストまでの時間の関係や、採取の範囲が限られることなどから対象樹種数が未だ少ない。今後更に機会を見て追加実験をしてゆきたいと考えている。

表一1のうち針葉樹の値はバラツキが比較的大きい。これは、広葉樹が面のある1枚の葉を対象としているのに比し、針葉樹はその葉の構造から数葉のまとまりを対象にせざるを得なかった為と思われる。カイズカイズキを使って径1%, 長さ20%ほどの1葉でテストもしてみたが、細く小さいものでは、放熱の効果が大きいためか、黒焦になるだけで火はしない。

全般として、樹葉は15,000 ~ 11,000 kcal/m²h ほどの

範囲内に発火限界はあるとみられる。重みづけの平均をみても、大凡「13,000 kcal/m²h」というものが樹木の輻射受熱による発火限界といえよう。

なお、本実験の発火は総て「無炎発火」である。葉面に赤点 (Red Spot) がついた時をもって発火時としたが、この赤点はそのまま面積が拡大してゆくのみであって、表一1にみられる20,000 kcal/m²h 以下の熱では「炎上」には至らない。これに比し、木片 (100×100×15%杉単板) では5000 kcal/m²hで「無炎発火」し、木片 (40×30×3%合板) では14,900 kcal/m²hで、はや「有炎発火」をするのである。筆者の輻射計ではその容量上測定不能であったが、当該試験装置の傘状のラジエーターの内部では、40,000 kcal/m²hをこえる極めて高い輻射量をうけるという。ここに表一1の試料を入れると大部分はポツと音をたてて発炎したが、サンゴジュのみは発炎に至らなかった。炎の出にくいことから、防火上有効な樹であるといえよう。

註1) 樹木の耐火力

樹木の防火機能はその防火力によって支えられる。そして防火力は「耐火力」と「遮熱力」で構成されるものと考えられる。

ここで耐火力とは、難発火性或いは難燃性を示し、遮熱力とは、難透熱性を示すものである。

註2) Technical Report 3814

ISO/TC (Technical Committee)92「建築材料および構造のための防火試験部会」から試験方法の開発のため作成された報告である。

ISO:International Organization for Standardization (本部 British Standards Institution, London)

文 献

岩河信文 (1982):

都市における樹木の防火機能に関する研究:

東京大学学位論文

Summary: As to the study on fire preventive function of trees, this paper, as the result of some ignitability tests, shows the critical radiation to auto-ignition of leaves. The critical radiation is the most important barometer which estimates the fire preventive power of trees.

By means of ignitability test apparatus, it has been observed the radiation limit, and also time and properties of leaves until they come to ignit (auto-ignition).

The critical radiation of leaves are as follows,

evergreen broad leaves tree	13,450 kcal/m ² h
deciduous broad leaves tree	13,930 kcal/m ² h
needle-leaves tree	12,020 kcal/m ² h