樹木の発炎燃焼性に関連する未燃ガスの発生について

The Generation of Unburned Combustible Gas Relate to the Flammability of Trees

岩崎 哲也*

Tetsuya IWASAKI

Abstract : It was confirmed by the existing studies that, when it was exposed by only radiant heat, leaves of many species of trees ignited without flame but *Juniperus chinensis* cv. *Kaizuka* flamed lower than the tolerance limit of radiant heat. (It is said the lowest heat flux level of glowing as to coniferous trees was $13.95\text{kW}/\text{m}^2$.) The research on such danger is not progressing but which should be verified, for utilizing the fire prevention function of trees and for planning landscape in narrow residence, such as city. So, in this experiments, the concentration and transition of unburned combustible gas and the temperature under the leaves were measured about 23 species of trees, in this time the hydrocarbon was mainly measured as the unburned gas. The following results were obtained: (1) The states of hydrocarbon generating and temperature transition were obviously different depending on the species. (2) Three species of the family Cupressaceae discharged much hydrocarbon from the first stage of heating as well as *J. chinensis* cv. *Kaizuka*. (3) *Aucuba japonica*, *Prunus mume*, *Phyllostachys bambusoides*, and *Pleioblastus chino* generated hydrocarbon few from beginning to end. (4) *Viburnum awabuki*, *Ginkgo biloba*, and *Hydrangea macrophylla* generated few in first stage compared with the total quantity.

Keywords: fire prevention, fire resistance, radiant heat, flame, glowing

キーワード: 防火, 耐火性, 輻射熱, 発炎燃焼, 赤熱

1. はじめに

近年の大火災は、1976年の酒田市大火以降、倉庫火災であった滋賀県甲西町の火災を除けば、阪神・淡路大震災における同時多発火災にいたるまで20年近くの間発生していないほどに減少している¹²⁾。しかし、阪神・淡路大震災で経験したように、地震による家屋の損壊や、その後の火災から身を守るために、公園緑地等は避難場所として重要な存在である。阪神・淡路大震災では、避難場所を決める際、多くの被災者が自宅との近接性を重視しており³⁾、住居と近接した公園緑地等の防災機能向上が重要である。また大火が減少したとはいえ、平成13年の出火件数は全国で63,569件、死者は2,190人となっており⁴⁾、依然として生命や生活の場を瞬時に奪われる重大な災害であることに変わりはない。

わが国における樹木の防火力に関する研究は、関東大震災後の河田、柳田⁵⁾ほかによる震災跡地の樹木の被害状況調査にはじまり、その後、木村ら⁶⁾、中村⁷⁾による樹葉の含水率の測定、井上ら⁸⁾による樹葉が発炎に要する時間に関する研究などが行われ、近年は岩河、齊藤ら^{9,10)}による輻射熱に対する限界値の計測や遮蔽率などに関する研究が行われている。このうち定量的に数多くの樹種を扱った研究としては、中村による含水率や引火時間の計測、岩河による輻射受熱発火限界の計測が代表的なものである。その結果、中村の研究により含水率と葉の厚みを主因子とした樹種別の耐火力の強弱が示され、岩河らの研究により常緑樹 $15.58\text{kW}/\text{m}^2$ 、落葉樹 $16.16\text{kW}/\text{m}^2$ 、針葉樹 $13.95\text{kW}/\text{m}^2$ という輻射受熱発火限界が得られている。また、この輻射受熱発火限界により火災からの距離限界を導くことが可能であって、避難場所等の空間計画に利用できる唯一の研究成果であるといえる。しかし、これら輻射熱に関する研究は、おもに無炎発火を対象としたものであり、炎をあげて燃焼する‘有炎発火’に関する研究は進展がほとんどない。先行研究では、カイズカイブキに関し、樹葉だけでは $23.37\text{kW}/\text{m}^2$ でも有炎発火しないが、苗木全体を加熱した場合は $12.09\text{kW}/\text{m}^2$ で有炎発火し炎上に至ることが確認されてい

る⁹⁾。これによって、樹木の種類あるいは葉の密度などの状態によって炎上する危険性があり得るということが示されており、狭隘な居住環境において防災効果があるものとして樹木を活用していくうえで、検証すべき課題である。

一般に、光をともなってガス相が燃焼する現象が有炎発火であり、木質材料の発火限界温度付近では CO_2 や CO とともに発生する CH_4 を主とする CH 化合物が主な未燃ガスとされる¹¹⁾。そこで本研究では、樹種別の防火力を考えるための一つの要素として、強い輻射熱を受けた場合の CH 化合物の発生状況の違いを加熱試験によって明らかにし、樹木の有炎発火に関する特性を考える際の一助とすることを目的とする。

2. 実験の方法

(1) 試験装置の概要

樹種別の違いを比較するため、できる限りその種を特徴づける状態の供試体を用いて実験を行う必要がある。そのため、苗木のように後天的要素が複雑に反映した供試体ではなく、樹葉のように比較的普遍的な部位を精密に計測できる能力を持った装置を用いる必要がある。試験装置は、国土交通省国土技術政策総合研究所(旧建設省建築研究所)が保有するコーンカロリー試験機(東洋精機製作所製)を用いた。この装置はISO防火部門で提案している試験法において使用される規格に準じており、未燃ガス発生の傾向を把握するためにも十分な性能を有していると考えられる。また、樹葉のように供試体が少量であっても対応できる構造と分析性能を有している。主要部は、加熱炉、排気フード、ダクト、架台等からなる本体、ガスサンプリング装置とガス分析計、試験体ホルダーなどで構成される。本研究に関する部分の仕様は以下の通りである。

- (i) 加熱炉: ニクロムヒーター, 最大 3kW 容量, 加熱強度 $0 \sim 50\text{kW}/\text{m}^2$
- (ii) 試験体ホルダー: 加熱面積 0.0088m^2 の正方形
- (iii) ガス分析装置: フレームイオン式全炭化水素分析計¹³⁾

* (株)森緑地設計事務所・緑総合研究所

写真-1 コーンカロリー試験機

表-1 供試樹種

	樹種
針葉樹	カイヅカイブキ、クロマツ、サワラ、シノブヒバ、スギ、ヒノキ、ヒマラヤスギ
常緑広葉樹	アオキ、クスノキ、サンゴジュ、シラカシ、スダジイ、トウネズミモチ、マテバシイ、ヤブツバキ
落葉広葉樹	アカメガシワ、アジサイ、イチヨウ [※] 、ウメ、ケヤキ、ヤマザクラ
タケ・ササ類	アズマネザサ、マダケ

※イチヨウは裸子植物だが、樹木の防火力に関する主な既存研究では落葉広葉樹として扱われており、防災の機能に関する樹葉の形状から本論でも落葉広葉樹として扱う。

(iv) その他：K型熱電対、データロガーサーモダックEなど

(2) 実験条件、手順の概要

(i) 輻射熱

架台上に設置した試験体ホルダーに樹葉を載せ、上部のニクロムヒーターから発生する輻射熱を曝した。樹葉表面における輻射熱は、過去の研究⁹⁾において多くの樹種が無炎発火に至る20kW/m²に設定した。なお炉の安定のため、暖機には180分を、また一回の試験につき60分のインターバルを設けた。

(ii) 供試体および試験回数

表1の23種の樹葉を供試体とした。採取後、時間を置かず輻射熱に曝すことを目標としたため、屋敷林等の居住空間で一般的な樹種のうち、つくば市付近で調達可能なものを選定した。また、それぞれについて成葉3枚、質量約2.5gとなるように採取したが、針葉樹や一部の樹種で調整が困難なものは質量のみ約2.5gとした。一回の試験は20分間とし、それぞれ上記インターバルを置いて3回ずつ、計69回実施した。

(iii) 計測項目について

試験に際し、①樹葉の裏面温度、②CH濃度、③CO₂濃度、④質量減少量などについて、2秒間隔で計測を行った。また、樹葉の状態変化を観察するとともに、無炎発火が目視によって認められた経過時間を記録した。

3. 実験結果の整理

(1) 燃焼特性

樹種別の傾向の違いはあるが、全体として図1に示すような特性を有していることが明らかとなった。すなわち、樹葉の裏面温度は加熱開始とともに急激に上昇するが、100℃付近で横這い状態を示す。ほとんど100℃にとどまらない樹種もあるが、図1のトウネズミモチのように数秒から数分間100℃付近を示すものが

図-1 トウネズミモチの葉を加熱した場合の温度、質量、CO₂濃度、CH濃度の経時変化（輻射熱20kW/m²）

多く、同時に質量が急速に減少していることから、この100℃以下の時間は樹葉に含まれている水分が保持されている時間をあわすと考えられる。そして100℃を超えると再び温度は上昇し、同時にCH濃度が上昇をはじめる。このころからCO₂濃度が急に上昇をはじめており、平常値から燃焼状態の値に移行していることが分かる。また、CO₂濃度の上昇に対しCH濃度上昇の傾きが緩くなっていることから、発生したCHも燃焼していると考えられることができる。その後、CH、CO₂ともに一旦頂点を示したのち緩やかに減少するが、ある時点で無炎発火が起こる（グラフ中に赤熱と表示）。この無炎発火は、線香の火様を呈し炎は確認されず、葉の組織が徐々に燃え広がっていくものであり、その速さは樹種によって遅速がある。この少し前にCHは上昇しはじめており、少し遅れてCO₂が上昇しはじめる。その後は、CHの増加→CO₂の増加ならびにCHの減少→CO₂の減少、という状態を繰り返しながら、両ガスとも再び頂点を示したのち減少する。

(2) 樹種別の傾向

3回ずつ行った試験の結果、CH濃度の経時変化に関して図2および図3に示すように樹種ごとに特徴的な傾向が認められたため、23種の樹種について類型化を行った。その結果、表2に整理するように、ほとんどの落葉広葉樹は最初の頂点が低く無炎発火後に高い頂点のある2山型を示し、多くの常緑広葉樹は最初の

表-2 CHの発生傾向

類型	1	2 a	2 b	2 c
特徴	無炎発火の有無に関わらず、グラフの山が2分化しないか、ほとんど確認できない。	グラフの山が2分化し、その谷は約0.25ppmに減少。はじめの山が二度目の山より著しく低い。	グラフの山が2分化し、その谷は約0.25ppmに減少。はじめの山と二度目の山の高さがほぼ等しい。	グラフの山が2分化するが、その谷は0.5ppmより高い。あるいは2分化が確認できない。
樹種	アオキ、アズマネザサ、ウメ、マダケ	アカメガシワ、アジサイ、イチヨウ、ヤマザクラ、サンゴジュ	クスノキ、ケヤキ、シラカシ、スギ、スダジイ、トウネズミモチ、マテバシイ、ヤブツバキ	カイヅカイブキ、クロマツ、サワラ、シノブヒバ、ヒノキ、ヒマラヤスギ

下線は針葉樹を示す

図-2 温度、CH濃度の経時変化
(サンゴジュ 輻射熱 20kW/m²)

図-3 温度、CH濃度の経時変化
(カイツカイブキ 輻射熱 20kW/m²)

頂点が比較的高く無炎発火後の頂点とはほぼ同程度の2山型を示した。一方、スギを除く常緑針葉樹は2つの頂点が間をあけずに連続する傾向があり、単体に近い高い山型となった。また、アオキ、アズマネザサ、ウメ、マダケの4種は無炎発火が起こってもCHの再上昇がほとんど見られず、低い単体の山型を示した。

(3) CH発生状況の樹種比較

前項でCH濃度の経時変化に関する傾向を整理した結果、既存の研究で指摘されているように、樹木の生活・形態的な性質によって燃焼の性状が特徴づけられていることが確認された。そのため、さらに樹種別の有炎発火に関する特性を把握するために、CH発生状況について、以下の2点を比較した。

(i) 一定時間内におけるCH積算濃度 (ppm・sec)

受熱開始後一定時間内のCH積算濃度を樹種別に算出した。これによりCH発生量の指標とするものである。加熱初期の指標として多くの樹種が最初の頂点を越す5分間と、収束期までの指標として発生を終えるかほぼ終了するまでの15分間について、各樹種3回の試験の平均値を求めることとした。

図4には、左から各樹種を15分間の積算濃度の高い順に並べてある。これによると、サワラ、シノブヒバ、カイツカイブキなどの常緑針葉樹とクスノキ、ヤマザクラなどの15分間の積算濃度が高く、アオキ、シラカシ、マダケ、アジサイ、アズマネザサ、ウメなどが低い値を示している。また、この2値の比を整理すると表3ようになる。この表によると、サンゴジュ、イチヨウ、アジサイ、ヤブツバキなどは初期の発生量が全体に比較して少なく、シラカシ、カイツカイブキ、シノブヒバ、クロマツなどは全体の発生量に対する初期の発生量が大いことが分かる。

(ii) 最大値までのCH発生量 (ppm/sec)

最大値までの単位時間当たり濃度を算出した。これより、量および時間の2側面から(どれだけ早くたくさんのCHを放出するか)の指標とするものである。(i)と同様に、各樹種3回の試験の平均値を求めた。

図5は、各樹種のCH値の平均と無炎発火時間をプロットした散布グラフである。無炎発火時間は従来の研究でも多く計測され^{7,9,10,14)}、針葉樹の発火は早いことが確認されている。また、無炎発火による放射熱量が加わることによって、葉の組織の熱分解および未燃ガスの発生が促進されると考えられる。この図によると、常緑針葉樹は図のY軸方向に、タケ・ササ類と常緑広葉樹は

X軸方向に、落葉広葉樹は原点に近い両者の中庸に分布している。

図-4 CH積算濃度(輻射熱 20kW/m²)

表-3 CH積算濃度の5分/15分比

樹種	5分/15分比	樹種	5分/15分比
1. シラカシ	0.80	13. ヒマラヤスギ	0.42
2. カイツカイブキ	0.79	14. クスノキ	0.42
3. シノブヒバ	0.77	15. アカメガシワ	0.39
4. クロマツ	0.74	16. トウネズミモチ	0.35
5. アオキ	0.74	17. マテバシイ	0.33
6. ケヤキ	0.71	18. スダジイ	0.32
7. サワラ	0.69	19. ヤマザクラ	0.30
8. ヒノキ	0.68	20. ヤブツバキ	0.26
9. アズマネザサ	0.62	21. アジサイ	0.22
10. スギ	0.55	22. イチョウ	0.19
11. マダケ	0.55	23. サンゴジュ	0.11
12. ウメ	0.51

図-5 最大値までのCH発生量および無炎発火時間
(輻射熱 20kW/m²)

4. まとめ

今回の試験により、樹種の違いによる樹葉の燃焼特性、特に未燃ガスの代表的な成分であるCH化合物の発生状況の違いが確認された。特徴的な事項をつぎに整理する。

- ① 初期から多量のCHを発生し無炎発火が早い：カイヅカイブキ、サワラ、シノブヒバ、ヒノキ
- ② 初期の発生量が少ない：サンゴジュ、イチョウ、アジサイ
- ③ 終始発生量が少なく無炎発火が遅いあるいは無い：アオキ、ウメ、マダケ、アズマネザサ
- ④ 無炎発火時間に関しては、針葉樹は早く、常緑広葉樹とタケ・ササ類、ウメは遅く、落葉広葉樹はその中庸である。

過去の研究⁹⁾におけるカイヅカイブキの有炎発火では、12.09kW/m²の放射受熱中に無炎発火が起こり、その後しばらくして炎を上げて燃焼したとされている。このことから、無炎発火と有炎発火が同時ではないことが分かる。すなわち、無炎発火がきっかけとなり有炎発火が誘発されているか、あるいは温度上昇の過程で無炎発火が先に起こり、その次段階としてより高い温度において有炎発火が起こっているということである。今回の試験におけるカイヅカイブキの燃焼特性を見ると、CHがきわめて早い段階から一気に放出され、その途上で無炎発火が起こり、さらに最高値にかけてCH濃度が急激に高くなっている。このことから、有炎発火は、無炎発火ののちCH濃度が最高値を示すまでの段階で起こると考えられる。また一般に、空気中における可燃ガスの燃焼は、ガスの成分によって決定づけられる上限濃度と下限濃度の範囲で起こるため、空気中でその濃度に達しているかどうかの有炎発火性の一つの判断基準である。今回のカイヅカイブキの試験で確認された最高濃度は、CH₄の下限燃焼濃度5%¹²⁾に達しておらず有炎発火も確認されていないが、過去の研究で有炎発火が確認されていることから、今回の試験でカイヅカイブキに近い特性を示す樹種は、試験体の量や気流の強弱、放射熱強度によって燃焼濃度に達しやすいものと考えられる。この特性を整理するとつぎの通りである。

- ・ 初期のCH発生量が多い。
- ・ 最大値までの単位時間当たりCH濃度が高い。
- ・ 無炎発火時間が早い。

これまでの図表を比較してカイヅカイブキに類似した特性を示すものは、サワラ、シノブヒバ、ヒノキのいずれもヒノキ科の3種で、同じ針葉樹でもスギ、クロマツ、ヒマラヤスギは広葉樹に近い発生状況を示しており、有炎発火に関する特性としてはヒノキ科と一線を画すものと考えられる。スギやクロマツの樹葉はヒノキと比べて精油含有率が低いこと¹²⁾や、スギやクロマツが防火樹として扱われている地域が存在する事実、これを裏付けるものであると考えられる。一方、広葉樹およびタケ・ササ類は、針葉樹と比較してCHの最大値を示すまでの時間が遅いことや、初期の発生量が少ないことが特徴であり、特に常緑広葉樹とタケ・ササ類は、無炎発火時間が遅いことから、有炎発火が起こりにくいとされる。その傾向はサンゴジュ、アオキ、マダケ、アズマネザサで特に強い。また、カイヅカイブキをはじめ枝葉が密生するタイプの樹木は、発生した未燃ガスが滞留して樹冠内部の濃度が高まりやすいと考えられる。こうした樹種は、一般に枝葉が密生するほど樹冠内部の枯れ葉が増えて防火上のマイナス面になるなど、植栽管理面と絡む特性もある。

これらより、ヒノキ科の特定種をはじめとした有炎発火に関する特性が示されたと考えるが、近年のガーデニングブーム等を反

映した造園計画に際し、ヒノキ科を多用する機会は増えていると考えられる。ヒノキ科の造園的な有用性を否定するものではないが、一般的に樹木が高い防火力を有するなかで、樹種と使い方とに配慮したい場合があることを認識する必要があると思われる。

5. 今後の課題

今回の試験では、多くの樹種の葉が発火する放射熱強度として20kW/m²を設定したために、無炎発火前と発火後のCHを別途に考慮していない。これらを別々に比較するためには、今後、より低い放射受熱における実験との比較が必要である。また約2.5gという少量の葉の加熱実験であり、火災時における有炎発火の実際に際しては、樹葉の密度をはじめ、受熱面積、形状、蓄熱量、風の有無、口火の有無などが大きく関係すると考えられる。特に、CH濃度の点から枝葉の密生度や植栽環境は重要であり、こうした関連要素に配慮した試験研究が必要である。また、広葉樹のうちCH発生量が多いものとしてヤマザクラとクスノキがあり、有炎発火をとまなう燃焼性状を示す可能性がある。今後、燃焼実験などによる検証が望まれる。

謝辞

本研究に際し、吉田正志氏（国土交通省 国土技術政策総合研究所 防火基準研究室 主任研究官）には、多年にわたり、耐火性試験に関するご指導、ご助言を賜った。この場を借りて御礼申し上げる。

補注及び引用文献

- 1) 消防庁（2001）：平成13年版消防白書：ぎょうせい，544pp.
- 2) 文献1)では、建物焼失面積33,000m²以上の火災を集計している。
- 3) 若生謙二・清水正之・田中隆・松江正彦・野島義照（1998）：阪神・淡路大震災後の公園の避難地利用について：ランドスケープ研究61(5)，773-776
- 4) 消防庁ホームページ<http://www.fdma.go.jp/html/data/h13_12.html#1>，2002.5.28更新，2002.10.1参照。
- 5) 河田杰・柳田由蔵（1924）：火災と樹林並に樹木との関係：土木学会誌10(2)
- 6) 木村英夫・加藤和男（1948）：樹木の防火性に関する研究：造園雑誌11(1)，11-15
- 7) 中村貞一（1961）：植栽の火災延焼阻止力の研究：島根農科大学造林学研究室特別報告第2号
- 8) 井上 桂・中元六雄（1951）：樹葉の燃焼：日本林学会誌33-3
- 9) 岩河信文（1982）：都市における樹木の防火機能に関する研究：東京大学博士論文
- 10) 斎藤庸平・岩河信文（1983）：樹木の防火機能に関する研究：造園雑誌46(5)，158-163
- 11) 日本火災学会（1997）：火災便覧 第3版，1,676pp.
- 12) 日本火災学会（1955）：火災便覧，1,549pp.
- 13) 全炭化水素分析計の比較セルにCH₄を用い、この波長分析にもとづいてCH濃度を把握するものである。波長分析であることからCHと表現する。
- 14) 山下邦博（1986）：針葉樹と広葉樹の発火性の相違について：火災Vol.36 No.5(164)，12-18