

消防研究所技術資料第15号

水幕と樹木の併用による延焼防止 向上効果に関する研究報告書

昭和60年 3 月

消防庁 消防研究所



カラーグラフィア1 密集市街地における住宅火災に対する
樹木防火(東京都・調布市)東京消防庁提供



カラーグラフィア4 樹木の燃焼状況
(建物開口部からの噴出火炎が激しく)
(マテバシイの木も燃え上った)



カラーグラフィア2 市街地大火の延焼状況
(酒田市大火において幅員15mの浜町通り)
(に火災が接近している様子)



カラーグラフィア3 樹木の燃焼状況
(樹冠を貫通した火炎は有風下においても)
(真上に立ち上る)



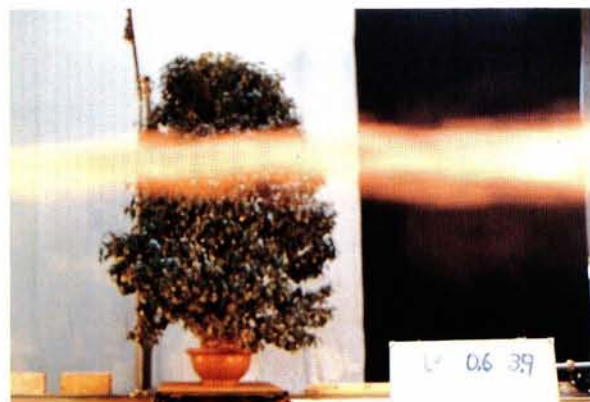
カラーグラフィア5 樹木の燃焼状況
(樹木の活性度が低下しているときには耐火)
(性の高いサザンカでも非常によく燃える)



カラーグラビア6 樹木の燃焼状況
 (枝葉密度の高いキンモクセイも強い輻射熱を受けて10分程度でその大半が焼失した)



カラーグラビア7 樹木の着火寸前の様子
 (サザンカ、チャボヒバなどの各種の樹木が強い輻射熱を受けて水蒸気を放出している様子。この後数十秒経過すると燃え始めた)



カラーグラビア8 煙の流れ
 (樹木から十分に離れた地点)



カラーグラビア9 煙の流れ
 (樹冠内部を煙が通過すると拡散しながら下方に流れた)



カラーグラビア10
 注水による樹木の燃焼抑制の状況
 (火炎が接近する箇所に重点的に注水すれば樹木の燃焼を防止できる)

カラーグラビア11
 樹木の焼損状況
 (火炎が左下から右上に通過したときの焼残り状況)



水幕と樹木の併用による延焼防止 向上効果に関する研究

山 下 邦 博

大地震後あるいは異常乾燥・強風下などの異常時に火災が発生すると、地震直後の混乱（電話不通、道路障害等）のため消防活動が遅れたり、あるいは火災の拡大が速くて火災が大規模化する恐れがある。火災が拡大すると、消防水利が不足してくるため、消防力だけでは制御できない状態が起こることも予測される。

そのような事態をなくするため、都市の不燃化、沿道の不燃化、避難場所・道路の整備、消防力の充実強化、消防水利の整備など種々の方策がとられつつある。この対策の一環として、緑地、空地を利用した延焼遮断帯を市街地に構築するという構想 が打ち出されている。

緑地・空地は、平常時においては都市環境の浄化、景観構成などの役目を果し、非常時においては防災遮断帯として機能するため望ましい延焼遮断帯といえる。緑地帯の幅が50m以上もあると、延焼遮断帯として十分であるが、市街地内に十分な土地が確保できないなどの理由から、緑地帯の幅が小さくなることも多分にありうる。そのような場合には緑地帯は完全な延焼遮断地帯にはならない。

消防サイドからみた場合、延焼遮断地帯としてたとえ不完全なものであっても、樹林あるいは周辺建築物に放水することにより、緑地帯をより完全な防火帯に作りあげることができる。

強風下において、水が吹き飛ばされて有効注水になり得なかったものが、樹林があると防風機能が加わって有効注水になりうるし、また、少ない水量で延焼防止が可能となる。この研究では、樹林（緑地）と水幕を併用して延焼防止を図る場合の特徴と限界を明らかにし、警防活動の指針を探ることとした。

目 次

| | |
|------------------|----|
| 第1章 樹木防火の実態 | |
| 1. 樹木の効用 | 1 |
| 2. 樹木の防火機能 | 1 |
| 3. 樹木防火の奏功事例 | 3 |
| ア. 密集市街地における住宅火災 | 3 |
| イ. 酒田市大火 | 3 |
| ウ. 関東大震災火災 | 4 |
| 4. 樹木防火の問題点 | 7 |
| 5. まとめ | 9 |
| 第2章 樹木の燃焼 | |
| 1. 研究の目的 | 11 |
| 2. 研究の現状と問題点 | 11 |
| 3. 樹葉の乾燥 | 13 |
| 4. 樹木の燃焼 | 15 |
| 5. まとめ | 23 |
| 第3章 樹木の防火機能 | |
| 1. 研究の目的 | 25 |
| 2. 研究の現状 | 25 |
| 3. 樹木の輻射熱遮断機能 | 25 |
| 4. 樹木の防風機能 | 28 |
| 5. 樹木の気流温度低下機能 | 30 |
| 6. 水蒸気の放出機能 | 33 |
| 7. 火の粉の遮断機能 | 33 |
| 8. 炎の伸長防止機能 | 34 |
| 9. まとめ | 36 |
| 第4章 水幕の延焼防止効果 | |
| 1. 研究の目的 | 37 |
| 2. 研究の現状 | 37 |
| 3. 水噴霧による輻射熱遮断機能 | 37 |
| 4. 予備注水の有効時間 | 41 |

| | |
|----------------------------|----|
| 5. 噴霧注水による温度上昇抑制効果 | 44 |
| 6. 着火防止に必要な注水速度 | 46 |
| 7. 水噴霧の拡散状況 | 47 |
| 8. まとめ | 48 |
| 第5章 水幕と樹木の併用による延焼防止向上効果の観測 | 49 |
| 第6章 水幕(散水)装置付き防火樹帯 | 55 |

第1章 樹木防火の実態

1. 樹木の効用

昭和20年代から30年代の半ばにかけて、飯田市大火（昭和22年4月）、鳥取市大火（昭和27年4月）、及び岩内町大火（昭和29年9月）のように市街地大火が続発¹⁾した。これらの火災をみると、燃えるものがなくなるまで燃え続けるか、あるいは風がおさまってようやく鎮火するという状態で、消防隊による攻撃型防御が期待できなかった。この理由は、当時、市街地にバラックのような老朽建物が多く残っていて火勢が強かったのと、消防力がまだ弱体であったためである。

近年、建物の不燃化、道路の整備及び消防力の強化に伴って、市街地大火は著しく減少した。しかし、現在でもなお、多くの都市で木造建物が残っており、一旦火災が大規模化すると昔と同じように燃えるものがなくなるまで燃え続ける危険が潜在する。

このような拡大火災（街区火災）に対処するために、建物の不燃化を一層普及させるとともに道路の拡幅と沿道建物の不燃化を図り、火災を一街区に封じ込める必要がある。延焼遮断帯²⁾すなわちほぼ一定面積ごとに道路を拡幅して防火帯を構築するのは有用な手段ではあるものの、多くの人と金がかかるため実現させるためには長い年月が必要で、緊急の防火対策になりにくい。

一方、経済の発展とともに、都市が発達し、人口が都市に集中してきた。これに伴って公害などの種々の都市問題が起きている。都市環境の向上あるいは悪化した環境の回復を目的にして緑地の構築に対する要求が高まっている。

緑地は表-1に示すように、防塵機能、防音機能、遮光機能、防風機能、防雪機能、防火機能、土砂流出崩壊防止機能、及び水源涵養機能などの多くの機能を有する³⁾。緑地の個々の機能はそれ程高くなくても、全体として果す役割は高く、今後都市における緑地に対する期待はますます大きくなっていくといえる。

都市計画あるいは都市再開発にあたって緑地ぬきにしては語られず、都市の安全性、健康性、能率性、快適性などを考慮して緑地を適正に配置しなければならない。

都市防火のみの目的で道路の拡幅を行うことは困難であっても、防災、保健休養、あるいは環境保全のために、オープン・スペースをもった緑地帯を構築することは他の方法と比較しても投資効果は高いと考えられる。

2. 樹木の防火機能

樹木の防火機能を更に分類すると表-2の通りである。樹木は固体障害物となって、火災からくる輻射熱を遮断し、樹木周辺の風速を低下させる。樹木は火災から熱を受けると葉に含まれる水分を放出して可燃性混合ガスの濃度を薄め隣接建物の着火防止に寄与する。また、水分を放出することによって火災の気流温度を低下させ、樹林に囲まれた避難場所の安全を高める。強風下においては、火の玉と呼ばれるほど大きい火の粉が飛散するが、樹木はこの火の玉を完全に遮断して飛火の発生を防止する。

樹林があることのような直接効果があるのみならず、樹林がある箇所には消防隊が進入して防御

表-1 緑の機能の分類（只木らによる）

| 人間に対する緑の機能 | 分類 | | |
|------------|--------|--|------------|
| | 中分類 | 小分類 | |
| 単独機能 | 物理的效果 | 防塵機能 | 土砂流出崩壊防止機能 |
| | | 防音機能 | 水源涵養機能 |
| | | しゃ光機能 | 防火機能* |
| 防風機能 | | | |
| 防雪機能 | | | |
| 生物化学的効果 | 吸塵機能 | 環境指標機能 | |
| | 湿度継続機能 | | |
| 心理学効果 | 美化機能 | 安息機能 | |
| | 修景機能 | 審美機能 | |
| 重合機能 | | 環境保全機能 保健休養機能 コミュニティ存在基盤としての機能 人間の生活を支持する生活財としての機能 | |
| 総合機能 | | グリーンコンタクト機能 緑と人間の本質的關係に由来する効果効用効果、効用より高次元のものでいわば超人的精神的な面での存在価値。 | |

*防火機能は筆者の追加

表-2 樹木の防火機能

| 機能 | 効果 | 活用 |
|--------|----------|-----------------------------|
| 輻射熱遮断 | 着火の防止 | 防火線の設定 避難地、避難道路の 安全確保 |
| | 温度上昇抑制 | |
| 防風 | 延焼速度への減少 | 火災旋風の発生防止 飛火発生防止 |
| 気流温度低下 | 着火時間の遅延 | |
| 水蒸気放出 | 気流温度低下 | |
| 火の粉遮断 | 火の粉飛散防止 | |

するため、防火帯として役立つし、また、避難者はこの樹林に守られて安全に避難することができる。

樹林はこのような付加的価値をもつ他に、まだ我々の気づいていない効果をもつものと推測される。

樹林を有効に活用するには、樹林の個々の機能がどの程度あるのか明らかにする必要がある。緑地は大概の場合オープン・スペース（空地）と重なっており、この組合せによって樹木の防火機能は強化される。樹林及びオープン・スペースの防火機能は、樹木の本数、オープン・スペースの面積など構成内容によって異なる。

庭木、街路樹のような孤立木の延焼防止効果は、樹木の高さ、枝張り、枝葉密度、枝下高さなどによって異なり、また、延焼防止の有効領域も変化する。1本の樹木でも、樹高と枝張りが大きけ

れば、密集した住宅地において、火災の延焼防止に役立つ。公園の樹林はたとえ防火用に植えられているものでなくても、かなりのオープン・スペースをもつため延焼防止に役立ち、また一時避難場所としても利用できる。

防火を目的にして計画された理想的な樹林帯は、火災の規模を想定して、延焼防止効果を最大に発揮するように作られるもので、火に強い上木、中木、下木を上手に組合せた広いオープン・スペースをもつものといえる。

3. 樹木防火と奏功事例

ア. 密集市街地における住宅火災

この火災は、昭和58年1月に、東京都調布市の住宅密集地で起きた火災である⁴⁾。火災当日は、風は殆どなかったが、異常乾燥注意報が発令されていた。現場は、南北両方向に隣接建物、西側には敷地境界にサワラの木が10本程度植えられており、この西の隣接建物に延焼する危険があった。サワラは図-1に示すように樹高は7～8m、枝張りは1.5m程度で、これらの樹木が1.5m間隔で植えられていた。これらの木の回りに下木として、モチ、ツバキがあった。消防隊は、火災現場に駆け付けると間もなく、出火建物の人命検索を行うとともに消火活動に当たった。また、後着した消防隊は、出火建物の西側からも進入し、延焼防止に当たった。

サワラの木は、出火建物の2階開口部からわずか2～3mしか離れておらず、そこから噴出した火炎にあふられ、大部分が焼失した。サワラの木の下にあった物置小屋には延焼したが、西側隣接建物への延焼は防止された。

この火災において、樹木は、輻射熱を遮断して延焼防止に役立ったのみならず、消防隊の進入を容易にして防火線の設定に役立った。(カラーグラビア1参照)

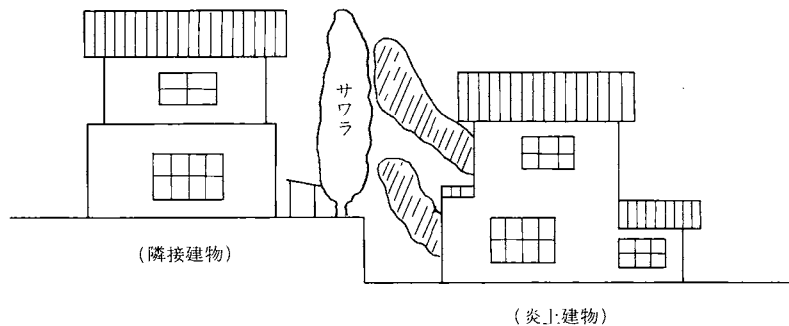


図-1 延焼防止に役立った樹木

イ. 酒田市大火

昭和51年10月29日の夕刻、山形県酒田市の中町から出火した火災は、折からの強風に煽られて拡大し、翌日の早朝まで燃え続けた。焼損面積は22.5haにも及び、近年稀な大火となった。(カラーグラビア2参照)被災区域内にはほところどころに耐火建物があったものの、木造建物が圧倒的に多く、火災が拡大する一因となった。

被災区域内及び焼止り線付近には、樹木があったが、まとまった箇所は少なく、数ヶ所を除いて、大部分は延焼防止に余り役立たなかった。酒田市大火の焼損範囲内における樹木の分布状況を図-

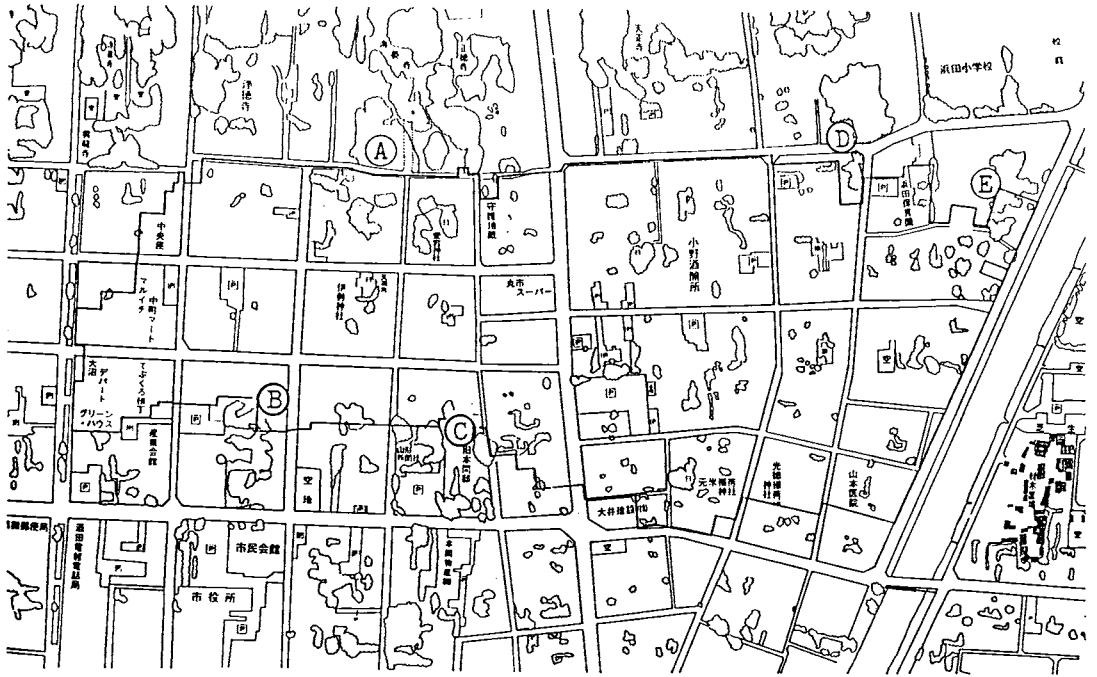


図-2 樹木の分布状況（酒田市大火）

2に示す⁵⁾

延焼防止に役立った箇所は図中の①、②～⑤の5地点で、これらは焼止り線の8%を占める。①箇所は火災初期には、火災の風下に位置していたが、火災の接近する頃になると、風向が変化したことにより風横になって延焼を免れた。図中の②③④⑤箇所はすべて火災の風横であり、輻射熱は強いものの煙、熱気流及び火の粉がくる心配がなく、消防隊の接近も幾分容易であったと推定される。

④、⑤地区は、河川に近く水利が豊富であったため、消防隊は樹木あるいは建物に注水して防御することができた。

この火災をみると樹木の延焼防止に役立った区域は殆どが火災の風横であり、そこにはオープン・スペースがあるかまたは水利が豊富にあった区域に限られる。

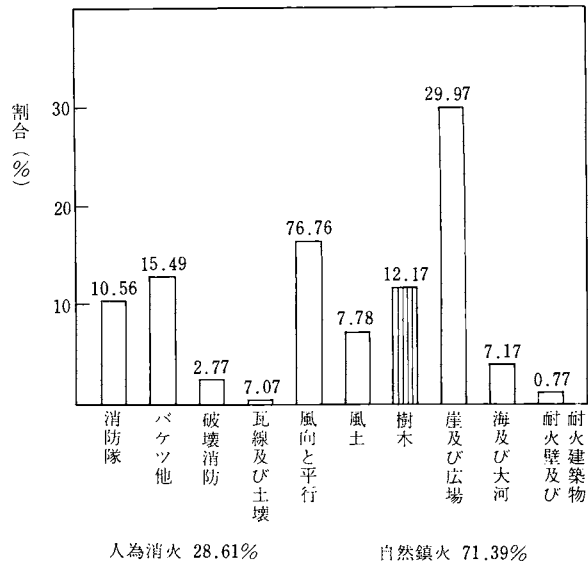
岩河⁶⁾は、被災区域内にあった419本の樹木について被害程度を調査し、常緑広葉樹として、マサキ、ツバキ、タブが、また、落葉樹としてカキ、ユキヤナギ、サクラが、また、針葉樹としてクロマツ、アカマツが多かったと報告している。被害の程度は、落葉広葉樹と針葉樹でひどく、常葉広葉樹では、樹木の被害の程度は少なかった。

ウ. 関東大震災火災

大正12年9月1日午前11時58分に起きた大地震の後数十ヶ所で火災が発生して3日間燃え続けて未曾有の災害となった。

この火災を契機に、特別都市計画法が制定されたのを初め、火災の延焼⁸⁾ 火災旋風⁹⁾ 及び樹木防火¹⁰⁾の研究が開始され、都市火災に対する認識が一段と進んだ。関東大震災火災の焼止り要因を図-3に示す⁷⁾ この火災において樹木による焼止りの割合は12.14%であった。当時の林業試験所に勤

めていた河田・柳田両氏は、樹木と火災の関係を調査し、樹林・樹木が延焼防止に役立つのみならず、避難場所の安全性向上に役立ったことを示した。



図—3 焼止り要因（関東大震災火災）

河田らの調査結果から主たるものを以下に示す。

- (1) 火先の正面を防ぐの作用は幅約20間以上の樹林にして、上木としてシヒノキ、シラカシの類を下木としてヤツデ、アヲキバ、ユズリハ、ヒメユズリハ等の常緑樹を植栽せるものにあらざれば充分ならざるもこの他のものと雖火の側面に延焼するを防止する作用は相当顕著なるものなり。
- (2) 針葉樹の並木又は樹木は、潤葉樹のそれに比して一般に防火能力薄力なり殊にクロマツ、アカマツは弱くサクラは比較的強し。
- (3) 緑葉を有する時期に於いてイテフ殊にその大木の並木は防火能力頗る偉大なるものなり。
- (4) 潤葉樹林中比較的防火能力の大なるものはシヒノキ、カシ、ケヤキ、ムクエノキ、モミジ等にして就中シヒノキは其効力著大なるものの如し。
- (5) 植込、樹林又は並木にしてその下木が植栽せられあるものはこれ無きものに比して防火能力大なるは勿論なるもこの下木中マツデ、アヲキバを植栽せるものは効果殊に著しとす。
- (6) 植込又は並木がその中腹以下を煉瓦塀又は土塀亜鉛塀を以って保護せられるときは一層防火能力を発揮し得るものなり。
- (7) 或る幅に対し全部に一樣に植込みたる樹帯の防火能力は帯の中央に空地を存して内外二列に密着したるものに劣るものの如し。
- (8) 並木の内側若は外側に一帯の空地を存するときはその防火能力一層顕著となる殊に火災と直接させる側に空地を存する場合は防火能力比較的大なるものの如し。

河田らは避難場所としての公園及び広場の安全性についても言及した。岩河は河田らの調査結果及び井上の報告を修正加筆して表—3としてまとめた。

表一 3 関東大震災における避難地の安全性と樹木の効果（岩河による）

| 分類 | 広場及公園 | 面積 | 状況 | 樹木の状況など |
|------------------------------|--------|---------|------------------------------------|---|
| 広場に避難民を収容した。火に囲まれて、安全であった場所。 | 上野公園 | 83.4 ha | 一部焼失スルモ、避難民多数無事 〔50万人〕 | 樹木はシイノキ、ツバキ、マツ、イチヨウ、ケヤキ、カエデ、ヤナギの高木があった。焼けた家屋に近いものが焼けた。全く枯死したものは少なく、シイノキは枯死しても枝葉は焦げず、火の粉を防いだ。多くの人命が守られた。 |
| | 芝公園 | 48.2 | 園内建築物一部焼失スルモ大体無事避難民多数 〔5万人〕 | 焼失した鉄道病院に隣接してシラカシ、クロマツ、ケヤキの大木が密生して防火に効果があった。シラカシは焼けず、ケヤキの一部の葉が焼けた。東照宮も延焼を免れ、多くの人命が守られた。 |
| | 浅草公園 | 31.7 | 観音堂中心ノ広場ハ安全、避難民無事 〔7万人〕 | 樹木地は浅草寺付近の小部分にすぎなかった。ケヤキ、クロマツ、アカマツ、スギ、ヒノキ、カエデ、サクラ、シイノキ、シラカシ、アカガシ、ヤナギ、ヤツデ、アオキ、コウヤマキがあり、特にイチヨウの大木とシイノキが多かった。観音堂、五重塔が火災を免れた。 |
| | 日比谷公園 | 18.1 | 園内松本楼ハ焼失スルモ、他ニ被害ナシ、人命多数 | 地震で倒壊焼失した松本楼を取りまく、イチヨウ、サルスベリ、タラヨウ、ヤツデ、アオキ、カキで火の粉を防いで付近への類焼をさげぎった。このうち枯死したのは、カヤ、サルスベリ、ヤツデ、タラヨウなどの一部で、ヤナギ、イチヨウは新芽をふいて樹勢を回復した。 |
| | 湯島公園 | 1.2 | 周囲ノ樹林ニヨリ社殿等ミナ安全、避難民多数 | ウメ、カエデを主とし、人家に接した部分にはシラカシ、ヤツデ、アオキなどが密集し、枯死はしたが、周囲からの火の粉を止めた。中央にイチヨウの大木があり、シラカシ等は防火の役をした。 |
| | 深川岩崎邸 | 4.0 | 建築物ハ焼失スルモ庭内中央無事、避難民2万人余保護スルヲ得、樹林多数 | 建物が公園の一隈に片寄っていて、庭園内に樹木と7千㎡の池とがあり、周囲に2mのレンガベイトシイノキの植込とで包囲されていた。内部にはモミジ、クロマツがあり、中島のクロマツは枯死し葉は変色したが、木造家屋は焼けなかった。 |
| | 宮坂前広場 | 21.5 | 避難民多数、皆無事 〔30万人〕 | 外部に幅広い内壕と旧城壁とにかこまれ、その上面積が大きかったため、たとえその一部建物が焼失しても延焼を免れ、人命が守られた。 |
| 同じく危険であった場所 | 坂本公園 | 0.6 | 樹林黒焦、何物ヲモ残存セズ、焼死40 | シラカシ、エンジュなどの高木はあったが、小面積で、周囲に木造家屋が密集していたため火を防げなかった。園内にも家屋が点在していて全焼した。死者40人 |
| | 数寄屋小公園 | 0.1 | 樹林黒焦、何物ヲモ残存セズ、焼死多数 | プラタナス、アオキ、ヤツデ、モッコク、カシノキ、マツの約10年生であった。比較的大きかったプラタナスも防火効果は小さく、火勢を防げなかった。焼けた家屋から遠かったヤツデ、アオキ、カシ、モッコクの小群落が残った。死者多数。 |
| | 両国橋側公園 | 0.2 | 焼死者多数 | クロマツ、シイノキ、カエデ、サルスベリ、センダン、キョウチクトウで高木はなかった。小面積で三方から火に囲まれたため全焼した。しかも枝葉まで焼えつくした。シイノキだけは残った。死者多数。 |
| | 本所被服廠跡 | 4.0 | 樹木ナシ、焼死30,000余人 | 西はコンクリートの建物（焼失）、北と南は道路、東は郵便局（焼失）に夫々接し、土地の形状は長方形であった。周囲には板壁と1m幅の溝とがあった。樹木はなく、3万人が死んだ。 |
| | 小梅徳川邸 | 3.3 | 焼死者数百人 | 東は向島の土堤、南は運河、西と北とは市街地、長方形の土地、周囲に木柵、植込あり、建物はほとんど焼失した。枝葉はことごとく枯れて変色した。一部黒焦した周囲に通ずる橋が焼失したため多くの死者を出した。樹木は散生的。 |

「避難地としての公園及広場」河田、柳田 1924。

「都市林の防火的効用」井上 1969。

これらの表から、避難地の面積が10ha以上の公園や広場は安全で1ha～10haの公園・広場は、周辺に樹木があれば安全性がより高くなるとしている。

大正12年当時の市街地の建物は殆ど木造で、火勢も強く多数の火の粉が発生したのは想像に難くない。今日のように防火造・耐火造建物が普及してくると、火災の勢力も弱く、火災の速度・火の粉の発生量も当時より少なく、より狭い面積でも安全になると推定される。現在のように土地の有効利用を迫られる場合、建物構造の変化を考慮して、付帯施設及び樹林の利用法を見直すことが不可欠である。

エ．樹木防火の問題点

樹木の延焼防止効果が顕著に表れるのは、樹木があったお蔭で延焼を免れる場合である。樹木によって延焼防止がたとえ果せなくても、延焼遅延には役立っている筈である。樹木の延焼防止効果を明らかにするには、効果の程度ばかりでなく、効果のあった空間領域と効果のあった期間（時間帯）を決めなければならない。延焼防止効果は表—4に示すように効果の度合、効果のある範囲、効果のある時間帯が問題となり、それらはすべて、火災状況・樹木の状況に関係しそれらは時間的に変化する性質のものである。

表—4 樹木の延焼防止効果

| 火災状況 | 樹木の変化 | 樹木の延焼防止効果 |
|-------|-------|-----------------|
| 火災の発生 | 昇温 | 延焼防止効果 |
| | 水蒸気放出 | 輻射熱遮断 火の粉遮断 |
| 成長期 | しおれ | 防風 |
| | 変色 | 気温流度低下 水蒸気放出 |
| 最盛期 | 焦げ | 効果のあった期間 |
| | 着火 | 焼失するまでの期間 |
| 減衰期 | 燃焼 | 効果のある範囲 |
| | 焼失 | 樹木の風下領域 |

樹木の防火機能の中で、輻射熱遮断機能が一番重要である。ところが、樹木の形状及び樹木の空隙率の数量化が困難で、今までは個々の火災で輻射熱が何パーセント遮断されているか明らかにする機会が少なかった。近年、技術の進歩に伴って電子計算機及び画像処理装置などが普及して、比較的容易に輻射熱遮断率を求めることが可能になった。

このような状況下において、樹木の防火機能に対する詳細な分析が求められている。

延焼防止にあたって、放水だけに頼る場合あるいは樹木だけを活用するときにはそれぞれ表—5に示すとおり長短所がある。樹木は高い輻射熱遮断機能を有し、強風下においては、風を弱めて延焼を遅らせる。樹木の唯一の弱点は、強い熱を受けると燃え上がって防火機能を失うことである。

表-5 樹木と放水の比較

| | 長 所 | 弱 点 |
|---------------|---|--|
| 樹木による 延焼防止 | <ul style="list-style-type: none"> ●防風作用があるため、強風下では延焼防止に役立つ。 ●固定施設で輻射熱の遮断効率が高い。 | <ul style="list-style-type: none"> ●強い熱を受けると燃え出して、延焼防火効果が低下し、火の粉を出して飛火を起す恐れがある。 ●平常時において光を遮って暗くなる。また、落葉の管理に手間がかかる。 |
| 放水による 延焼防止 | <ul style="list-style-type: none"> ●延焼防止効率がよい。 ●可搬式である。 | <ul style="list-style-type: none"> ●多量の水が必要である。 ●強風下では吹き飛ばされて効果が小さくなる。 |

一方、放水によって延焼防止を図る場合には、その効果は非常に高いけれども、強風・烈風下では風に飛ばされて効果が半減する恐れがある。火災が拡大して消防水利が圧倒的に不足する際には、放水による火勢鎮圧は期待できない。消防水利が不足するときには、樹木・空地あるいは耐火建物といった他の延焼阻止要素と放水を組み合わせた防御が必要になる。

樹木と水幕を併用することによって、個々の弱点を補いあってより完全な防火帯を形成することができると推定される。水幕と樹木の併用によって発生すると推測される延焼防止向上効果を表-6に示す。この方法によって樹木の延焼防止効果が向上するばかりでなく、樹木の延焼防止の有効時間を伸ばすことができる。

表-6 水幕と樹木の併用による延焼防止向上効果

| 効 果 | | 向上効果（併用による） |
|-----------------|-----------------------------------|--|
| 放水(水幕) の 効 果 | 消火 延焼防止 燃焼抑制 防煙 | 効果の程度向上 輻射熱遮断 水蒸気放出 気流温度低下 火の粉遮断 範囲 |
| 樹 木 の 効 果 | 輻射熱遮断 火の粉遮断 気流温度低下 水蒸気放出 | 延焼防止有効範囲の増大 地上の枯れ草の燃焼防止 有効時間 樹木の燃焼を完全に防止して火災の全期間に有効となる。 |

5.まとめ

- (1) 市街地の樹林は、平常時には防音、防風、遮蔽、都市景観向上等を、また異常時には防災機能、特に火災時には延焼防止あるいは避難場所の安全性向上に役立つため樹林帯構築への投資効果は高いと考えられる。
- (2) 大規模火災の樹林帯による焼止り線をみると、関東大地震火災では全長の12%、酒田市大火では8%を占め、過去の大火において樹林帯が延焼防止に役立ってきた。身近にある例として住宅密集地の敷地の境界に植えられている樹林も延焼防止に役立った事例もいくつかある。
- (3) 過去の大規模火災の調査から、樹木の延焼防止効果はシイノキ、シラカシなどの上木とユズリハ、アオキなどの下木を混ぜて複層化させる外に、他の延焼阻止要因（土塀、空地、耐火建物）と組み合わせることによって高められる。

参考文献

- 1) 消防庁：消防白書（昭和59年版）
- 2) 建設省：都市防火対策手法の開発報告書、(昭和57年)
- 3) 只木良也編：みどり（緑地環境論）共立出版（昭和58年）
- 4) 東京消防庁：消防活動概要（昭和58年1月14日）
- 5) 消防研究所：酒田市大火の延焼状況等に関する調査報告書（昭和52年10月）
- 6) 建設省建築研究所：酒田市大火（昭和51年）調査速報（昭和51年12月）
- 7) 東京都防災会議：大震火災時広域避難場所の現況調査と適地選定に関する調査研究
- 8) 中村清二：大地震による東京火災調査報告 震災予防調査会報告 第百号（大正14年）
- 9) 寺田寅彦：大正12年9月1日の旋風について 震災予防調査会報告 第百号（大正14年）
- 10) 河田杰，柳田由蔵：火災と樹林竝に樹木との関係 土木学会誌 第10巻第2号（大正13年）

第2章 樹木の燃焼

1. 研究の目的

生きた樹木の葉は多くの水分を含み、また、絶えず根・幹・枝を通して水分の補給を受けるため非常に燃えにくい。樹木が炎上建物の近くにあっても一度は燃焼しても、火災が弱まれば樹木の燃焼は停止する。このように耐火性の高い樹木でも、火災から強い熱を長時間受けると燃えてしまう。樹木が燃焼すると条件によっては隣接建物への延焼の橋渡しをし、かつ、樹木の輻射熱遮断機能・防風機能などの防火機能が低下する恐れがある。

ここでは、樹木防火の特徴と限界を明らかにするため、樹木が燃え出す条件、燃焼特性及び燃焼による防火機能の低下について実験的に検討することとした。

2. 研究の現状と問題点

樹木防火に関する研究は比較的古典的なテーマで昭和20年代の初期、中期にかけて盛んに実験的な研究が行われた。その後一時中断されたものの、再び昭和50年代に入って都市防火を対象にして生木の耐火性を調べる研究が行われた。これらの研究によって主に次の4点が明らかにされてきた。

- (1)各種樹木の防火性の大小
- (2)樹木の輻射熱遮断機能
- (3)樹葉の着火条件
- (4)樹林帯の防火効果

上の項目について以下に概説する。

- (1) 各種樹木の防火性* についてはいろいろな指標をもとに分類がなされてきた。木村・加藤¹⁾は樹葉の含水率を調べ、含水率の大小あるいは、水分の逸散速度の大小から防火性を分類した。井上・中元²⁾は、各種の樹葉について発炎するまでの時間が長く含水量の高いものが防火樹に適しているとした。中村³⁾は、樹葉の脱水時間・引火時間及び発炎性について調べた。その結果、引火時間が長く防火に適している樹木が、発炎性の面で劣っているものがある。このため火災状況に応じた樹種を防火樹として選定する必要がある点を指摘した。以上の研究は生木から切り取った葉1枚1枚について調べたものである。関根⁵⁾は生木そのものをシュバンク・バーナーの前方に置き、加熱した後で口火点火による燃焼実験を行い、引火時間と引火してから消えるまでの時間から防火性の判定を行った。その結果、燃えにくい順位は、サングジュ、マサキ、モッコク、サザンカ、トベラ（クスノキ、ツゲ、サツキ）で、シラカシとカイズカイブキは共によく燃えると報告した。
- (2) 輻射熱遮断機能については、樹木の形状、空隙率、枝葉密度等が不均一で、かつ、輻射熱遮断率が隣接建物の位置・高さによって異なるため十分な検討がなされていない。中村⁴⁾は樹木を球状あるいは円筒状の物体とみなして、熱遮断率を計算して実験結果と比較した。岩河⁶⁾は防火樹林を設計する場合の資料を得るため、複数本の樹木を様々な配置に並べて熱遮断率を測定した。その結果によると、1葉張分の間隔をあけてちどりに配列にしたとき遮断率を90%以上

にするには3列必要であると報告した。

(3) 樹葉の着火条件について、井上・中元・関根及び岩河らによって研究され、着火条件は引火（口火による着火）と発火（口火なしによる着火）で異なることを示した。井上・中元は大概の樹葉は400～420℃で発火すると報告した。関根の結果によると樹葉が引火する限界放射照度は4000Kcal/m²・hr（常緑広葉樹）、12000Kcal/m²・hr（針葉樹）と報告した。これらの実験は輻射熱だけあるいは高温気体で加熱する場合の値で、輻射熱と対流伝熱が共存する場合については報告されていないため、今回の研究で検討した。

(4) 樹林帯の防火効果については、岩河の行った研究がある。この研究では、都市大火の規模を想定して、有効樹林の奥行と樹林の熱遮断率を計算し、樹林によって遮断された区域の温度（輻射熱も気流温度に加算する）が200℃以下になれば安全であるとしている。

以上述べたように、防火に適した樹種が明らかになり、樹木の輻射熱遮断機能が高いことが分かってきた。しかし、有風下の火災で、風下に樹木があると、火災と樹林の間で相互干渉が起こり、樹木が火炎の伸長と火災の拡大を抑え、一方、火災は樹木を燃焼させ、火の粉を発生させる。

火災と樹木の間相互干渉は樹木防火の限界を左右するものであるが、この方面の研究は殆ど行われていない。

樹木が燃える場合には、初めに火災に近い部分の葉が燃え、次いでその周辺の葉と小枝が燃える。樹木の幹は太くて熱容量が大きくかつ地面の近くにあるため加熱の程度が弱く燃え上がることは殆どない。ここでは表一7に示すように5つの実験（実験A、B、C、D、E）を行って樹木の燃焼の特性を明らかにした。

表一7 樹木の乾燥と燃焼実験

| | 年 月 | 場 所 | 樹 種 | 概 要 | 測定項目 |
|-----|-------------|-------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 実験A | 昭和59年12月 | 消研構内* | サクラ アオキ 他 | 熱風発生装置を使って樹葉の含水率の時間変化を調べる。 | 加熱温度、加熱時間と含水率の関係 |
| 実験B | 昭和59年6月～12月 | 消研構内 | ツバキ | ツバキなどを使って炎などによる燃え上がり状況を調べる。 | 樹木背後の角材の温度上昇 樹冠部の温度、 輻射熱 |
| 実験C | 昭和59年10月 | 成 田 市 | マテバシイ | 高木の燃焼状況を調べる。 | 樹冠部の温度、 輻射熱 |
| 実験D | 昭和59年3月～10月 | 消研構内 | サザンカ他 | シュババンク・バーナーを使い、口火点火による燃え上がりの様子を調べる。 | 含水率分布 輻射熱の遮断率 燃焼による輻射熱、幹の温度上昇 |
| 実験E | 昭和58年2月 | 消研構内 | キンモクセイ | 輻射熱による燃焼状況を調べる。 | 樹冠部の温度、 輻射熱 |

* 研究所の構内にある施設あるいは敷地

* 樹木の防火性とは、燃えにくい性質のことをいい、いったん火に逢ったあとの回復力の強さを耐火性といって区別されることもある。

3. 樹葉の乾燥

樹木はそれ自身だけで燃え上がることはまずなく、殆どの場合周辺建物が燃えているときあるいは地上の枯れ草と落葉が燃えるときに限って類焼する。樹木の燃焼は表-8に示す如く、樹木の種類、形状ばかりでなく、火災と樹木の位置関係及び火災の性状に左右され、時間的に激しく変化する。

樹木は主に火災から生じた熱気流と輻射熱で加熱される。樹葉は加熱されると初めしおれるが、その後、変色、炭化、着火などの状態変化を伴う。加熱温度と樹葉の変化の関係を表-9に示す。樹葉は変色・炭化する段階で水蒸気を放出し、可燃性ガスを出す。

樹木の乾燥状態は、気流（加熱）温度ばかりでなく加熱時間にも関係する。樹葉の加熱に伴う時間変化は重要で、引火時間、発火時間及び水蒸気放出継続時間、ひいては樹木防火の有効時間と密接な関連をもつ。

熱風発生装置の吹出口の前方に切り取った葉1枚を置き、加熱温度をかえて加熱時間と含水率の関係を調べる実験（実験A）を行った。熱風発生装置（竹綱製作所製Ns-2型）は20～400℃の熱気流を発生するもので、吹出口の前方約1m（流速4～5m/s）の地点に樹葉を固定し、一定時間加熱した後で含水率を赤外線水分計（長計量器㈱製PD1-240WMB）で測定した。樹葉は流れに対する抵抗が小さくなるように葉面を気流方向と平行にして固定した。

表-8 樹木の燃焼を左右する因子

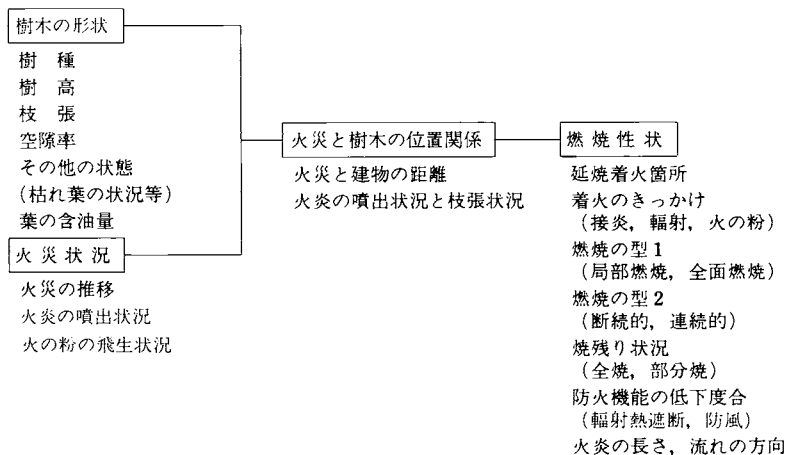


表-9 樹葉と加熱温度の関係（井上, 中元）

| | |
|-----------|-------------------------|
| 50℃以上 | : 樹葉は通気及び呼吸作用の増大により枯死する |
| 150℃～180℃ | : 焦げる |
| 200℃ | : 炭化するか心持ち褐色化する |
| 250℃ | : 完全に炭化する |
| 300℃ | : 葉を重ねるとその部分から灰化する |
| 380℃ | : 燃焼灰化する |
| 400℃～420℃ | : 発炎燃焼が開始する |
| 500℃ | : 無条件に発炎燃焼する |

アオキ及びモッコクについての実験結果を図-4(a), (b)に示す。加熱しない場合のアオキとモッコクの含水率はそれぞれ72%, 70%で、アオキの含水率が高かった。加熱温度が50℃のときには、加熱時間を20分にしても両方とも含水率は殆ど低下していない。一方加熱温度が80~110℃では、加熱時間が長くなると、時間に比例する形で含水率の低下幅が増加した。加熱温度が150℃まで低下し、その後は殆ど変化しなかった。

樹葉の含水率が高い場合樹葉は引火することもなく、高い水蒸気放出能力を有する。一方含水率が低下して水蒸気放出能力がなくなると樹葉は引火する条件が備わったことになる。樹葉が引火するときの含水率は樹種によっても異なるが、実験の結果から20~25%以下であると推定される。樹葉を加熱開始してから、含水率が20%まで低下するまでの期間は引火の危険が小さく、防火機能が大きいのであるため、樹葉の防火に対する有効期間と見做すことができる。

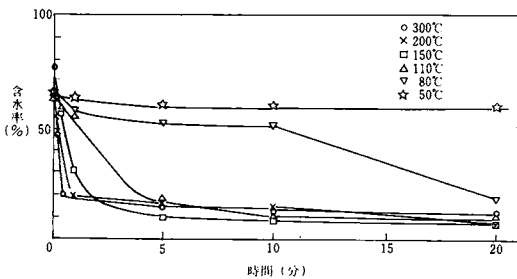


図-4(a) 含水率の時間変化 (アオキ)

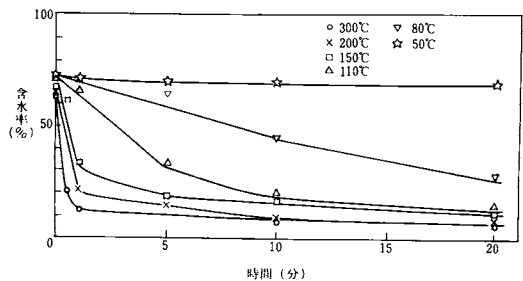


図-4(b) 含水率の時間変化 (モッコク)

この有効時間を図-4から求めた結果を表-10に示す。加熱温度が110℃のときの有効時間は10分(アオキ), 5分(モッコク)で、200℃のときは1分(アオキ), 30秒(モッコク)となり、アオキの方がモッコクよりも有効時間は長かった。

中村は加熱温度を105℃(乾燥するときの基準温度)にしたときの樹葉の脱水時間を測定して、脱水時間の長短から樹種の防火性の分類を試みた。実際の火災では熱気流の温度は任意であり、樹葉の水蒸気放出能力を推定する際には、種々な加熱温度における脱水時間、重量減少速度あるいは含水率低下曲線が分かっていると便利である。

種々の樹葉について高温環境下における含水率の低下度合を求めた結果を表-11に示す。加熱時

表-10 加熱温度と有効時間の関係

| 加熱温度 | モッコク | アオキ |
|------|------|-----|
| 80℃ | 20分 | 25分 |
| 110℃ | 5分 | 10分 |
| 150℃ | 1.5分 | 4分 |
| 200℃ | 30秒 | 1分 |
| 300℃ | 10秒 | 30秒 |

表-11 含水率の時間変化(10秒加熱)

| 樹種 \ 加熱温度 | 加熱前 | 300℃ | 200℃ |
|-----------|--------|--------|--------|
| ヒイラギ | 60.89% | 29.30% | 52.94% |
| ツバキ | 64.73 | 44.74 | 50.19 |
| ツゲ | 71.43 | 51.72 | 59.45 |
| モクセイ | 62.14 | 19.18 | 43.67 |
| マテバシイ | 58.85 | 15.66 | 40.74 |
| サザンカ | 69.43 | 36.88 | 52.90 |
| サンゴジュ | 82.93 | 70.54 | 73.86 |
| カイヅカ | 60.80 | 32.18 | 47.46 |
| マサキ | 67.92 | 20.18 | 53.21 |

間が10秒～20秒の場合の含水率低下からも樹種の防火性の判定ができる。針葉樹では高温環境下においては短時間に含水率が低下する。含水率の低下が速いということは一般に燃焼し易いことに対応する。

含水率の低下曲線は図-4の通りで、加熱時間に関して直線的に変わるものはない。しかし短い時間帯を考えると直線で近似でき、その時間帯の平均の水蒸気放出速度を推定することができる。

含水率の低下曲線は図-4の通りで、加熱時間に関して直線的に変わるものではない。しかし短い時間帯を考えると直線で近似でき、その時間帯の平均の水蒸気放出速度を推定することができる。

含水率 Q_1 の樹葉（全重量 W_0 ）が Δt 時間に含水率 Q_2 まで低下したものとすると、単位時間当りの水蒸気放出速度は(1)式で求められる。

$$W = \frac{W_0}{\Delta t} \times \frac{Q_1 - Q_2}{1 - Q_2} \quad (1)$$

樹葉重量が加熱によって減少する場合、放出される気体の中には水蒸気の他に、可燃性ガスも含まれているが、加熱開始直後においては重量減少は殆ど水蒸気の放出によるものと推定される。

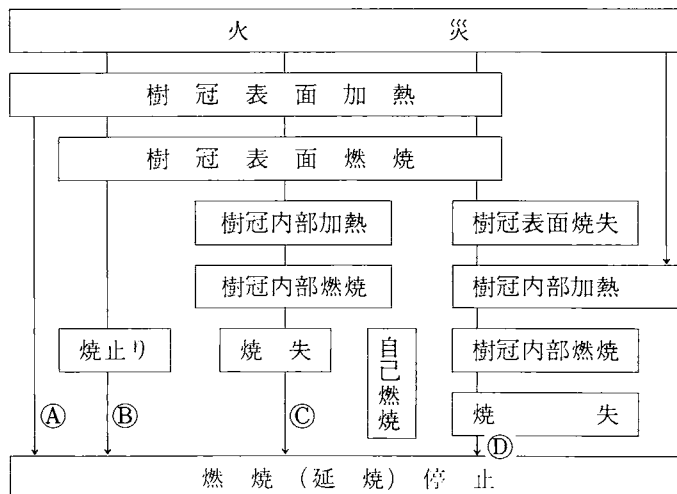
図-4と上式を用いて、任意の加熱温度における水蒸気放出速度を求めることができる。

4. 樹木の燃焼

樹木防火の特徴を明らかにするため、樹木の燃焼状況について分析を行った。燃焼による樹木の防火機能の低下あるいは燃焼による延焼危険の増大の程度は、燃焼の激しさと焼け残りの状況に係する。

炎上建物の周辺に樹木があると、樹木の燃焼パターンは表-12の①～④の4つの型に分類することができる。①は樹木が加熱されるだけで燃焼しない型で②は火災によって樹冠表面の一部が燃えただけで停止する型である。③は火災によって樹冠の表面が加熱され燃焼し、その火炎が樹冠内全体を加熱して樹冠全面が燃焼するもので自己燃焼型と呼ぶ。④は火災によって樹冠表面が燃焼した後で、樹冠内部が元の火災によって再び加熱されて徐々に樹冠全体が焼失する型である。樹木の焼

表-12 樹木の燃焼パターン



残りの状況を図-5(a)~(c)に示す。燃焼の型は燃残り状況にも対応し、(A)は図-5の(c)に、(B)は(b)に、(C)と(D)は(a)に相当する。一般の火災においては(C)、あるいは(b)の場合が殆ど考えられる。(c)の

樹木の燃焼状況は火炎の状況から分類すると、樹冠局部燃焼型に、また、それぞれは樹冠表面型と樹冠貫通型に分けることができる。

室内火災実験は一般に寸法が小さいばかりでなく、風の乱れが小さいあるいは輻射熱のつよさが小さいなどの種々な理由によって実火災と異なる性状を示すことがある。このため今回の一連の研究では室内実験の他に実大規模の火災実験を行って実大規模の樹木の燃焼を観測するように努めた。

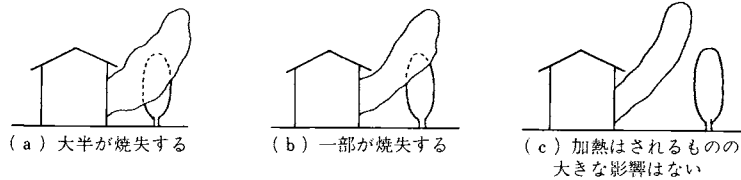


図-5 樹木の焼残り状況

(A) 室内実験による観測

有風下において、火災の風下にある樹木が燃焼する様子を詳細に観測するため、熱源としてヘプタン火炎を用いた火災実験(実験B)を行った。

燃焼容器の寸法：60cm×60cm

樹種：ツバキ

樹高・葉張：2.5m, 1.5m

鉢植のツバキを燃焼容器の縁から1m風下の地点に幹がくるように設置した。樹冠の風上側は直接ヘプタン火炎に接触した。樹木の燃焼状況をカラーグラビア3に示す。

ヘプタン火炎はツバキの樹冠内部に穴をあける形で徐々に伸びて行き、約3分後には樹冠を貫通した。火炎先端の移りかわりを図-6に示す。樹木が燃え上がった箇所は焼け残った。

図中のポールに高さ20cm毎に熱電対を取りつけ、気流温度の時間変化を測定した。この地点では高さ90cm~150cmの範囲が焼失した。このポール上の温度変化を図-7に示す。床上高さで140cm(焼

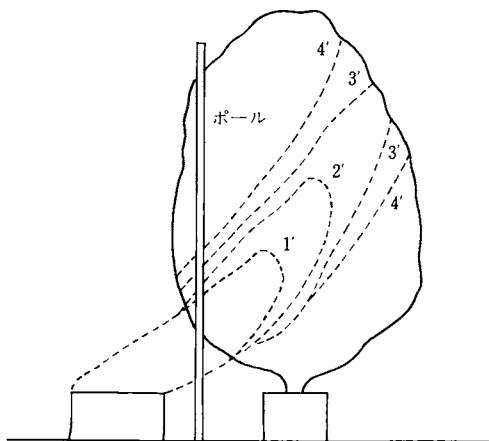


図-6 火炎前線の移りかわり(対流加熱支配のとき)

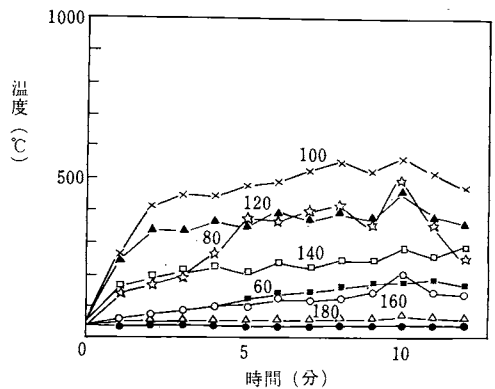


図-7 樹冠内の気流温度(高さ方向)(高さ20cm毎の気流温度)

失した箇所)では4分後には200℃に達しているのに対し、高さ160cm地点(焼け残った箇所)では4分後に100℃前後であった。この結果から、樹木が輻射熱と熱気流(対流伝熱)の共存によって加熱される場合、樹冠の焼失する限界温度は100~200℃の範囲にあることを示す。

樹木を設置しない場合についてヘプタン火炎周辺の気流温度分布及び熱流束分布を図-8(a)(b)に示す。この図と図-3を比較することによって大きく変化したことが分かる。

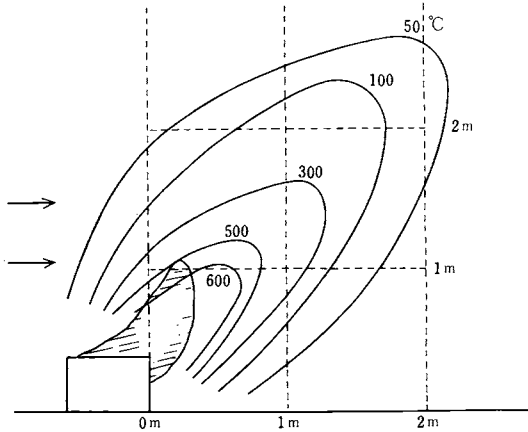


図-8 (a) 気流温度分布
(風速:1.0m/sのとき)

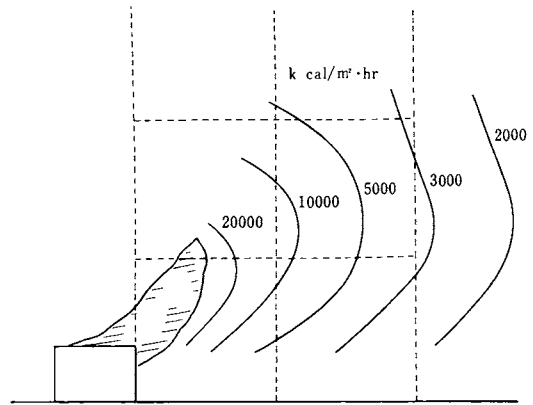


図-8 (b) 放射照度分布
(風速:1.0m/sのとき)

樹木がない場合には風の影響を受けて火炎の傾き(垂直軸よりみて)は大きいですが、樹木があるとき傾き角は小さくなって立ち上っている。特にこの傾向は樹冠内部で顕著で、火炎が樹冠を貫通する直前で大きく立ち上った。燃焼容器の縁から風下に4m離れた地点(高さ1.2m)に輻射計を置き、樹木がある場合とない場合の輻射熱の時間変化のちがいを図-9に示す。この図では、供試樹木の空隙率が10%以下であって輻射熱の遮断効果が顕著に出ている。樹木の樹冠局部燃焼の影響が出て

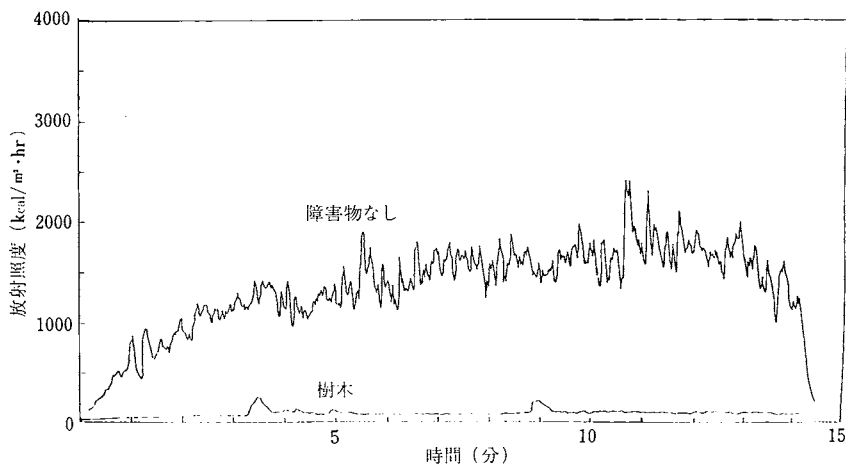


図-9 放射照度の時間変化 S=2.5m, H=1.2m
(樹木があると輻射熱が小さくなる他に時間変動が著しく小さくなる。)

おり、樹木があるとき、3分30秒、9分頃に輻射熱が増大した。この輻射率の増加が予想外に低くなっているのは、樹木が激しく燃える時間がわずか10～20秒で、輻射計がこの速い変化に十分に追従していないことと、樹冠内部が燃えて長い火炎を形成しても、同じ樹木の他の燃えていない箇所
の樹葉が輻射熱を遮断してしまうためである。

この例のように樹冠貫通型の燃焼の場合には、輻射熱の遮断機能の低下は小さい。

燃焼による樹木の重量変化の例を図-10に示す。このデータは、土（鉢の中にある）の上に出ている幹、小枝、葉の重量変化であり、下部にある鉢、土及び樹木の根の重さは除いてある。初期重量は11.0kgで、点火開始2分後に重量減少が最大2 kg/分であった。

(B) 実大規模の樹木燃焼実験

昭和59年8月、旧成田市税務署の建物を使った火災実験⁷⁾が行われた際に樹木の燃焼状況を観測（実験C）した。実験条件は次の通りである。

供試建物：3階建の耐火建物

出火階は1階

供試樹木：マテバシイ 2本

樹高 5.5～6 m

枝張 2.0～2.5 m

供試樹木を図-11に示す通り、建物の前方2.4mの地点に2本（樹木T1、樹木T2）植えて樹木の燃焼状況を観測するとともに、樹冠内部の温度及び樹幹表面の温度変化を測定した。樹木の燃焼状況をカラーグラビア4に示す。

樹木の燃焼は建物開口部からの火炎の噴出状況に左右された。出火室内の可燃物に点火してから3分20秒後に火炎が噴出し始め、樹木T2の上部が一部分燃え上がった。このときの火炎の噴出継続時間は1～2分で短く、樹木の燃焼範囲も少なかった。

開口部から第2回目の火炎噴出が開始したのは点火後10分後で、このときには火炎噴出継続時間は7～8分に及び、樹木T2の大半と樹木T1の一部が燃えた。樹木T2は出火室の直前にあり、燃え上がりも早くかつ燃焼の程度も激しかった。点火11分40秒後の燃焼状況をカラーグラビア4に

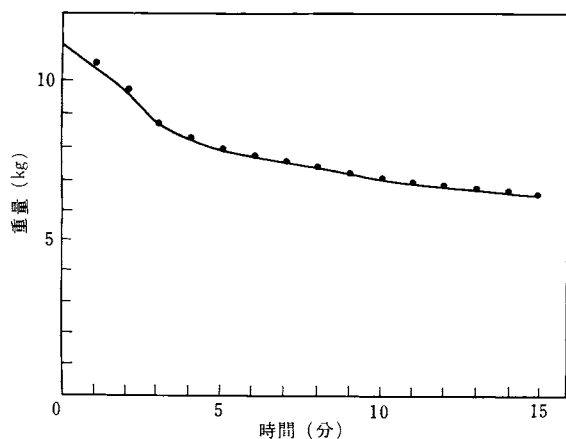


図-10 燃焼による樹木重量の変化

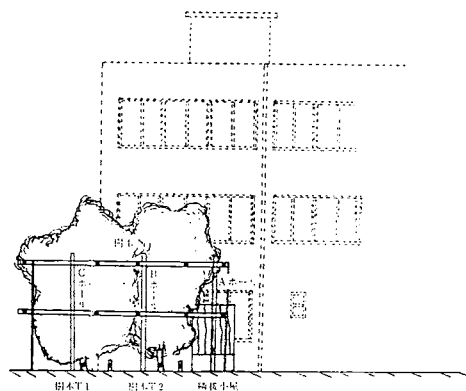


図-11 樹木の状況

示す。開口部から火炎の激しい噴出に伴って樹木の加熱側表面が燃え上がっているが、このように著しく燃え上がる期間は10~20秒で、非常に短い。

実験開始4分、11分、18分後の樹冠内部の温度及び、樹木背後に立てた角材(ヒノキ4cm×4cm)表面の温度を図-12に示す。4分、11分後には樹木T2の大部分が焼失しているのに対し、樹木T1は変化がない。18分後になると、樹木T1も上半部は焼失しており、また、地上の枯れ草が燃えて地上付近の温度が高くなった。枯れ草が燃えたのは、建物の燃焼が激しかったためで、出火室付近のかなり広い範囲が徐々に燃え広がった。この時刻において、樹木T1の上部は火災の熱気流が通過して加熱されており、また、地面近くの下層は枯れ草の燃焼で加熱されたため、地上3m付近の温度が一番低くなった。

樹木T2の樹冠内部の温度変化の例を図-13に示す。この地点は建物の開口部から火炎が通過し、また、一方で樹葉が燃え上がったために温度変化が著しかった。

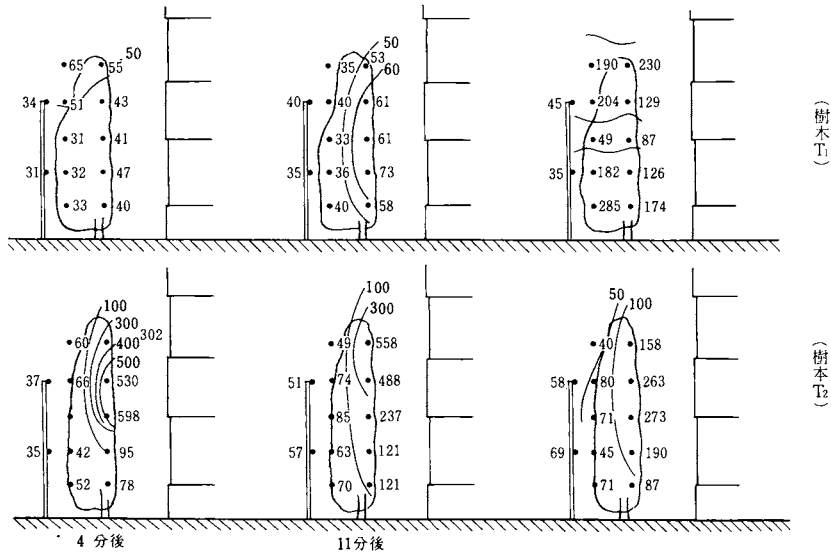


図-12 樹冠層内の温度分布

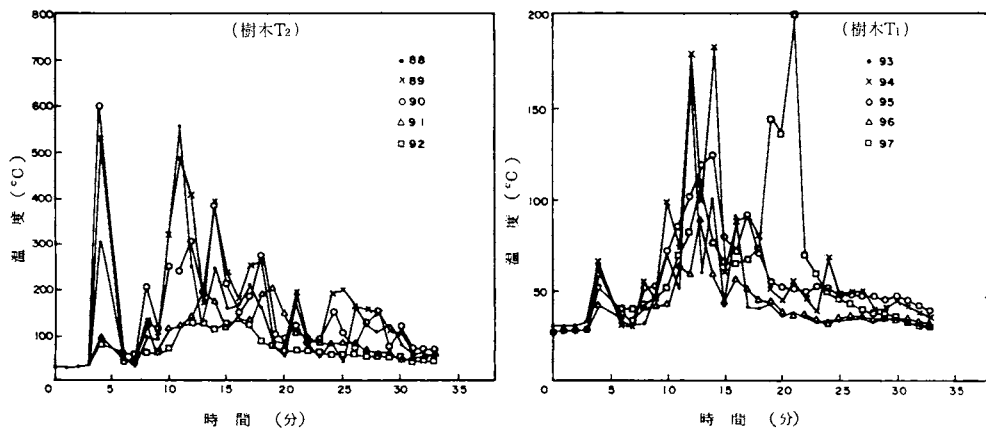


図-13 樹冠内の気流温度(高さ1mごと)

樹幹の耐火性を調べるため、地上30cm地点の樹幹表面の温度とその付近においた丸太（直径はほぼ同じもので、乾燥したヒノキ材）の表面温度を測定した結果を図-14に示す。

樹木T2の近くでは輻射熱が非常に強く、丸太は無炎燃焼を始めて温度が400℃まで達したのに対し、樹木T2の幹の温度は最高で100℃前後で、温度上昇が非常に遅いことがわかる。

(C) 輻射加熱支配時の樹木の燃焼

シュバンク・バーナーの前方に樹木を置いて機種による燃焼のちがいが及び燃焼による輻射熱遮断機能の低下について観測した⁹⁾ 実験装置の概要を図-15に示す。

熱源としたシュバンク・バーナーの火力が弱く、樹木をバーナーに接近させても発火（口火なしの着火）は起こらなかった。このため、10分間予熱することにより樹木を乾燥させ、樹冠の下方に口火点火して燃焼させた。

実験状態は次の通りである。

熱源：シュバンク・バーナー

（幅110cm×高さ180cm）

樹種：モチ、カイヅカイブキ、ツバキ、クロチク、マツ、ニッコウヒバ、キンモクセイ

樹高 2.0～3.2m

枝張 0.6～0.8m

加熱時間：10分間

放射照度：10000～16000Kcal/m²・hr

樹木を10分間加熱した後で口火点火すると、樹木は激しく燃え上がった。樹木の燃焼状況をカラーグラビア3に、また実験結果を表-13に示す。火炎の長さは樹木の下枝から計ると4～4mにも達した。燃焼継続時間は15～35秒で短かった。樹木が燃え上がる部分は樹冠部の加熱表面だけで残りは燃えないままに残った。

クロチクの場合は葉量が少なく、点火しても、点火箇所周辺が局部燃焼を起すだけで燃え上がることはなかった。この実験からも樹木が燃え上がるためには単位体積あたりの葉量が限界値以上になることが必要であることが予測された。クロチクの空隙率は約80%であり、口火点火によって燃え上がるためには空隙率が更に小さくならないと起きない。

水の補給を一定期間（2週間）停止して樹葉の一部分枯らしたサザンカについて同様の実験を行うと、樹冠全面燃焼が起り燃焼継続期間も50秒に及んだ。（カラーグラビア5参照）

樹木の燃焼前後において輻射熱の透過率（空隙率に対応するもの）を測定したものを同じ表-13に示す。

燃焼の弱かったクロチク、マツは燃焼前後において輻射熱透過率が殆ど変化していない。一方、よく燃え上がった樹木の場合には輻射熱透過率が燃焼によって減少していることがわかる。輻射熱遮断機能の低下が予想外に小さいのは、樹木の燃焼が加熱側表面に限られていたことを示す。樹木を10分間加熱したときの幹（直径28ミリ、サザンカ）の内部の温度変化を図-16に示す。強い輻射熱を受けても幹の内部の温度が余り上昇していないのは図-11と同じである。

この実験では、樹木の燃焼は葉量の大小あるいは樹木の活性化の程度によって異なるが、樹種による差は少なかった。差が認められなかった理由は加熱時間が10分でかなり長く、樹葉の含水率が

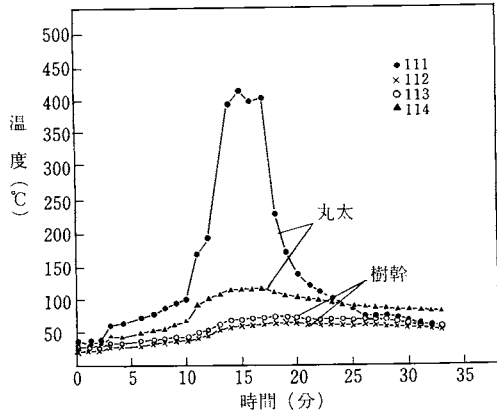


図-14 樹幹表面の温度

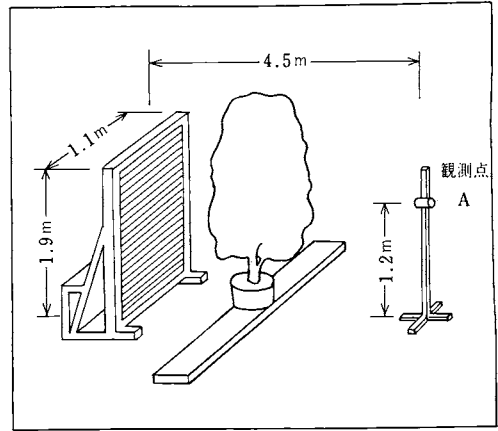


図-15 実験装置

表-13 樹木の燃焼状況及び輻射熱透過率

| 樹種 | 樹高(m) | 葉張り(m) | 最大火炎長(m) | 燃焼継続時間(秒) | $\left(\frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}}\right)$ | 樹木の燃焼前 | 樹木の燃焼後 |
|-----------------|-------|--------|----------|-----------|---|--|--|
| | | | | | | $\frac{E_1}{\left(\frac{E_0 + E_4}{2}\right)}$ | $\frac{E_3}{\left(\frac{E_0 + E_4}{2}\right)}$ |
| モチ | 2.6 | 0.9 | 3.3 | 20 | 582 | 0.61 | 0.70 |
| カイヅカ | 2.4 | 0.5 | 4.1 | 35 | 557 | 0.59 | 0.66 |
| ツバキ | 1.9 | 0.7 | 4.2 | 25 | 557 | 0.64 | 0.77 |
| クロチク | 2.3 | 0.8 | 0.3 | 5 | 545 | 0.79 | 0.79 |
| マツ | 2.0 | 1.0 | 2.4 | 15 | 557 | 0.41 | 0.43 |
| ニッコウヒバ | 3.2 | 1.0 | 3.9 | 35 | 570 | 0.47 | 0.58 |
| キンモクセイ | 2.3 | 0.9 | 5.2 | 20 | 560 | 0.45 | 0.52 |
| サザンカ (枯れたもの) | 2.6 | 1.0 | 3.9 | 50 | 560 | 0.43 | 0.71 |

(E_0 と E_4 は樹木を置かない場合, E_1 と E_3 は樹木を置いたときの輻射熱)

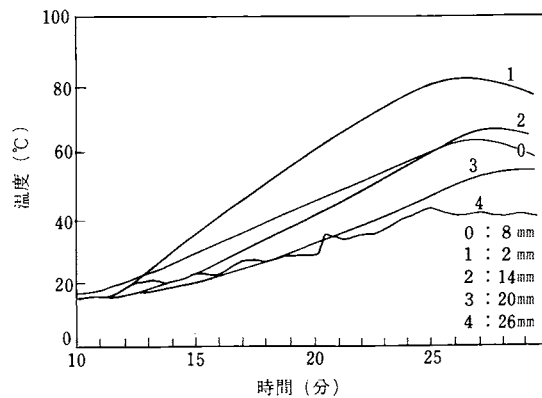


図-16 樹幹(直径28mm)内の温度

樹種に関係なく口火点火時にはほぼ均一に5~20%まで下がっていたためと推定される。

(D) キンモクセイの燃焼

供試建物の前方にキンモクセイ2本を植え、輻射熱によって加熱された樹木の燃焼条件を観測した⁸⁾。実験条件は次の通りである。

供試建物：1階建の木造建物

供試樹木：キンモクセイ 2本

(供試建物の北側)

樹高 4 m

枝張 2 m

サザンカ、ヒバ、モッコク

(供試建物の南側)

樹高 2.5 m

枝張 1 m

供試建物の開口部から火炎が連続して激しく噴出したため、樹木も絶えず燃え続けた。樹木の燃焼状況をカラーグラビア6に示す。

キンモクセイは開口部から噴出した火炎に接触して、樹冠部の上部が燃えた。次いで下方にあった窓ガラスからも火炎が噴出し始めたため、樹木の燃焼域が下方に移った。

この実験では輻射熱が予想外に強くて、樹木の一部は直ちに燃え出したもののその燃焼は弱かった。

樹木の燃焼の移りかわりを図-17に示す。実験開始後8分頃には、樹木の大半が焼失した。キンモクセイの燃焼状況をカラーグラビア6にまた、供試建物の南側においたサザンカ等の様子をカラーグラビア7に示す。

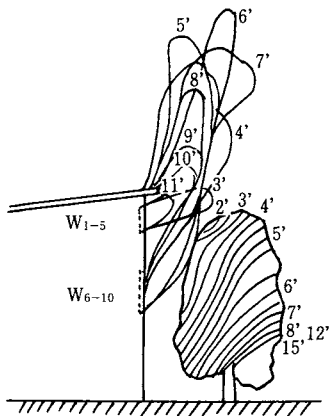


図-17 火炎前線の移りかわり

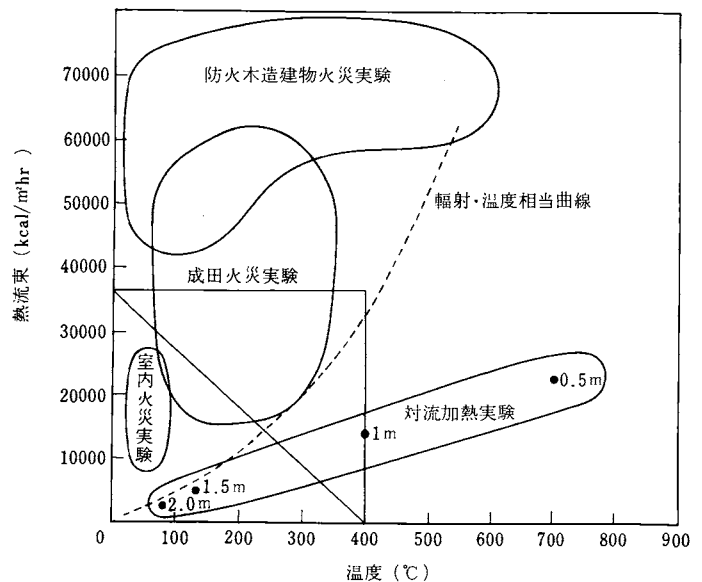


図-18 各種火災実験の熱的条件

供試建物の南側においた樹木は燃焼開始する前には、1～2分間水蒸気を激しく放出し、その後接炎ではなく輻射熱によって着火した。

この火災実験では、樹木の大半は焼失したが、燃焼の型は表-12のDであった。樹木の大部分が焼失しても、火災最盛期の輻射熱を遮断したため樹木の防火効果は高かった。

以上のいくつかの実験から、樹木の燃焼状況は輻射加熱支配と対流加熱支配の場合で異なることが確かめられた。輻射加熱支配の場合には、実験Dのように樹木の加熱側表面から徐々に燃焼するのに対し、対流加熱支配の場合には、炎と熱気流が樹冠内部に侵入して樹冠貫通型の燃焼になる。

樹木は一般に輻射熱と熱気流（対流加熱）の共存によって加熱されるが、それらの寄与の割合は条件によって異なる。

上述の実験について樹木の置かれた環境条件を横軸に気流温度、縦軸に熱流束とした座標系で表すと図-18の通りとなる。実大火災実験の場合には、輻射熱が非常に大きいことがわかる。

5.まとめ

- (1) 樹葉の火災に対する有効期間（加熱されたとき含水率が20%以上を保持する期間）は、加熱温度で異なり、防火性の高いアオキでも150℃では4分、300℃では30秒である。
- (2) 樹木の燃焼は、加熱（火災による）のされ方（輻射加熱支配、対流加熱支配）によって異なる。輻射加熱支配のときには、樹冠表面燃焼型で、対流加熱支配のときには、樹冠貫通型の燃焼となる。
- (3) 樹木の一部がたとえ燃え上がっても、燃えてない部分が防火機能を保持し続けるため、燃焼による樹木の防火機能の低下は一般に小さい。
- (4) 燃焼の激しさが樹種によってかわる場合とかわらない場合がある。輻射熱が強くて長時間加熱されるときには樹種による差は余りでない。

参考文献

- 1) 木村, 加藤: 樹木の防火性に関する研究 造園雑誌 11巻1号 (昭和23年)
- 2) 井上, 中元: 樹葉の燃焼 日本林学会誌 33巻4号 (昭和26年)
- 3) 中村貞一: 樹木防火の研究 造園雑誌 12巻1号 (昭和23年)
- 4) 中村貞一: 防火植栽の基礎的研究 京都大学農学部演習林報告 第26号 (昭和31年)
- 5) 関根孝: ふく射加熱による樹木のもえ方について 災害の研究 第12巻 (昭和49年)
- 6) 岩河信文: 防災都市計画の基本的条件 昭和51年度建築研究所年報
- 7) 消防研究所: 旧成田税務署建物火災実験報告書 (昭和59年)
- 8) 山下邦博, 林幸司, 稲垣実: 樹木の延焼防止効果に関する実験的研究 消防研究所報告 第56号 (1983)
- 9) 山下邦博: 樹木の燃焼挙動の分析 日本建築学会講演梗概集 (昭和58年9月)

第3章 樹木の防火機能

1. 研究目的

樹木は輻射熱遮断、防風、気流温度低下、火の粉遮断などの諸機能を持ちそれらが一体となって防火の働きをする。これらの機能のうちどれが一番重要であるかは火災状況、樹木形状、隣接建物との位置関係で決まる。無風下・弱風下の火災では、熱気流・火の粉は上空に流れるために、輻射熱遮断機能が重要となる。一方、強風下火災においては、炎が風下に傾き、熱気流・火の粉が風下に流れるため、火の粉遮断機能、気流温度低下機能も延焼防止におおいに役立つ。

ここでは、樹木による強風下火災の延焼防止を念頭におき、樹木の防風機能と防火機能の関係を中心に、樹木の防火諸機能を見直すこととした。

2. 研究の現状

樹木の防風効果については、防風林、防雪林あるいはビル風防止の樹林の設計を目的にして、多くの研究^{1)~3)}がなされ、林帯の及ぼす防風範囲などが明らかにされている。これらの研究によると、防風作用の及ぼす範囲は、風上では樹高の6倍前後まで、風下では樹高の35倍前後まで多少の影響が及ぶとしている。樹木の密度が余り密であると、風下に渦が生じて防風効果を減じるため、枝・葉・幹の合計が60%程度のときが、防風林として適当であることが示された。樹木の防風機能と防火機能の関係は密接であるにもかかわらず、殆ど検討されていない。山下は樹葉層内を流れる高温気流の温度低下について調べ、加熱温度が高くかつ枝葉密度が高い程、温度低下が更に大きくなることを実験により確かめた。

中村は、樹林帯のもつ水蒸気放出能力を計算し、都市防火に必要な防火林の基準を提案した。

樹木の火の粉遮断機能については、効果があることは指摘されているが、その効果の割合については明らかにされていないのが実状である。

3. 樹木の輻射熱遮断機能

樹木の輻射熱遮断機能は防火機能の中では代表的なものであるが、観測し難い。この理由は、輻射伝熱に対する形態係数の計算が困難であるばかりでなく、輻射熱遮断率が樹木からの距離と地上高さなどで大きくかわり、かつ樹木の形態が不均一で樹木の空隙率の測定が簡単でなかったことなどによると思われる。

近年は計算機が普及して形態係数の計算も比較的容易になり、また画像処理装置の普及によって樹木の空隙率の測定が短時間でできるようになった。

樹林により延焼防止あるいは避難場所の安全を図るときには、火災からの輻射熱を何%落せばよいか検討しなければならない。その過程において火災周辺の熱環境を明らかにするとともに各種物体の着火性あるいは人間の耐熱限界が問題となる。人間の耐容時間と輻射熱の関係及び各種物体の着火限界と放射照度の関係を表—14、表—15に示す。これによると人間の耐容限界値は2050Kcal/m²・hrで、木材の発火、引火の限界放射照度はおよそ28000Kcal/m²・hr、1400Kcal/m²・hrとなる。建物火災の放射発散度は5.0×10⁴~13.0×10⁴Kcal/m²・hrであり、火災から離れるに従い輻射熱は樹

表-14 人間の皮ふが耐えられる限界ふく射強度

| | |
|---------------------|------------------------------|
| 長時間の露出に耐えられる最大ふく射強度 | 2,050 Kcal/m ² ·h |
| 10~20秒後, 苦痛 | 3,600 |
| 3秒後, 苦痛 | 9,000 |
| 10~20秒で火ふくれ | 9,000 |

表-15 種々の物質の限界ふく射強度

| 物 質 | ふく射強度(Kcal/m ² ·h) | |
|-----------------------|-------------------------------|---------------|
| | 発 火 | 引 火 |
| 黒っぽいレーヨンまたは木綿の厚地のカーテン | 18,000 | 7,200 |
| 織 維 板 | 21,600 | 9,360 |
| 風雨にさらされたペイントの塗ってある杉板 | | 14,400 |
| 黒っぽい木材 | 28,800 | 10,800 |
| アスファルト屋根 | | 12,600 |
| 合 板 | | 14,400 |
| 表面を焦がした木材 | | 1,440~16,920 |
| ペイントの塗ってある木材 | | 14,400~21,600 |
| ハードボード | | 10,800 |
| 熱硬化性プラスチック | 72,000 | |
| 織 物 | 28,800 | |
| 木綿プリント地 | 20,880 | 10,800 |

乾いた試料が15分以内に発火する輻射強度
(湯本1971)

木がなくても相当減少する。

樹林・樹木の必要な熱遮断率は、距離の増大による減少を加味した上で、火災輻射熱を物体の着火限界放射照度あるいは人間の耐容限界放射照度以下に下げることから決められる。

炎上建物の火炎及びこれから出る高温の気流は上方に流れるため、延焼危険性は隣接建物の外壁の上部(軒下など)で高くなる。このため、延焼危険箇所は地上の3~6m上方の隣接建物の外壁を対象にするのが望ましい。

樹木による輻射熱の遮断状況は図-19(a)、(b)に示すように炎上建物、樹木及び隣接建物の三者の位置関係で大きく異なる。隣接建物の延焼危険箇所が樹木に近い場合(CASE 1とする)には(a)図に示すように、輻射熱は、火炎の面積 S_0 から発散される輻射熱 R_0 のうち近似的に $(1-\eta)R_0$ は遮断され、残りの ηR_0 だけ通過(通過量 R)する。但し、樹木の空隙率を η とする。

$$R = \eta \times R_0 \text{ ————— (2)}$$

一方、隣接建物の延焼危険の高い箇所が樹木から離れている場合(CASE 2とする)、輻射熱は火炎面積のうちの面積 S_2 から発散される輻射熱 R_2 と、面積 S_1 から発散される輻射率 R_1 であり、輻射熱

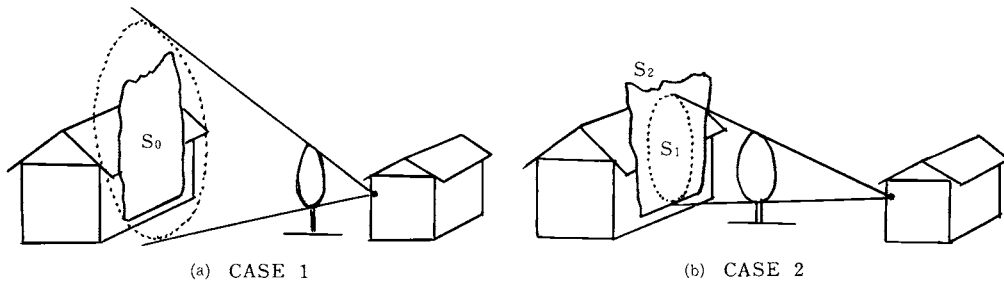


図-19(a) (b) 輻射熱の遮断状況

R_1 のうち近似的に ηR_1 だけが通過する。このため、隣接建物の延焼危険箇所での地点で受ける輻射熱は(3)式となる。

$$R = R_2 + \eta R_1 \text{—————(3)}$$

CASE 1のときは樹木の輻射透過率は樹木の空隙率 η そのもので、CASE 2の場合には、 $\frac{R_2 + \eta R_1}{R_2 + R_1}$ が樹木の輻射透過率となる。樹木の輻射透過率は、隣接建物の延焼危険箇所の輻射熱($R_1 + R_2$)のうちの R_1 と R_2 の割合と樹木の空隙率に左右される。

火災周辺の輻射熱を計算するには、火炎の形状(短形火面で近似し、火炎正面幅 B 、火炎の長さ L)、火炎の傾き θ 、市街地の状況(建ぺい率 n 、延焼速度比 m)、風速 V などに依存する。火災輻射熱は次式で求めることができる。

$$R = E_0 \sigma \psi \text{—————(4)}$$

但し、 E_0 は放射発散度、 σ は放射率、 ψ は形態係数であり、形態係数の計算は、他の論文⁴⁾を参照されたい。

炎上建物に隣接する建物の延焼着火危険箇所の温度がどのように上昇し、どの位の時間で着火する状態になるかを明らかにしておく必要がある。この場合、隣接建物の外壁を半無限固体と見做すと、輻射熱 R を受けたときの温度上昇は次式で求められる⁵⁾

$$T - T_0 = \frac{R}{\alpha} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \right) - \exp \left(hx + h^2 \kappa t \right) \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} + h\sqrt{\kappa t} \right) \right\} \right] \text{—————(5)}$$

上式で R :放射熱、 x :表面からの距離、 $\kappa = \frac{\lambda}{c\rho}$ 、 $h = \frac{\alpha}{\lambda}$ 、 α :熱伝達率、 c :比熱、 ρ :密度、 λ :熱伝導率である。延焼着火時間は延焼危険箇所の表面温度が一定値 T_* に達した時に起きると仮定して $h\sqrt{\kappa t} < 0.1$ のときには次式で推定できる。

$$t = \frac{[\pi c \rho \lambda (T_* - T_0)^2]}{4R^2} \text{—————(6)}$$

着火するときの限界温度は多くの人によって調べられているが、この値は観測者によって異なり、 $300 \sim 600^\circ\text{C}$ の範囲の値をとる。⁵⁾

CASE 1の場合、樹木の輻射熱遮断率は樹木の空隙率に大きく依存する。樹木の葉枝密度 σ ($= 1 - \eta$)は空間分布をもち、従って樹木の空隙率も場所によって異なる。

画像処理装置を用いて、樹木の空隙率を測定し、この空隙率と他の実験で得た輻射熱透過率を比

較すると図-20の通りであった。

CASE 1 の場合には、輻射透過率と空隙率は本来一致するものであるが、これらに幾分差が認められるのは空隙率が場所によって異なるためである。

実験 D において、ヘプタン火炎の風下に樹木を置き更に風下に輻射計を置いて測定した結果は前述の図-9の通りである。樹木があると輻射熱は著しく減少しているばかりでなく、時間変動が小さくなる。輻射熱が時折増加しているのは樹木の一部分が燃え抜け、樹冠部の風下端から火炎が噴出したことによる。

樹木の一部が絶えず燃えていても、未燃領域にある樹葉が輻射熱の遮断に寄与するため、たとえ樹木の一部が燃え上がっても輻射熱遮断機能の低下は小さい。

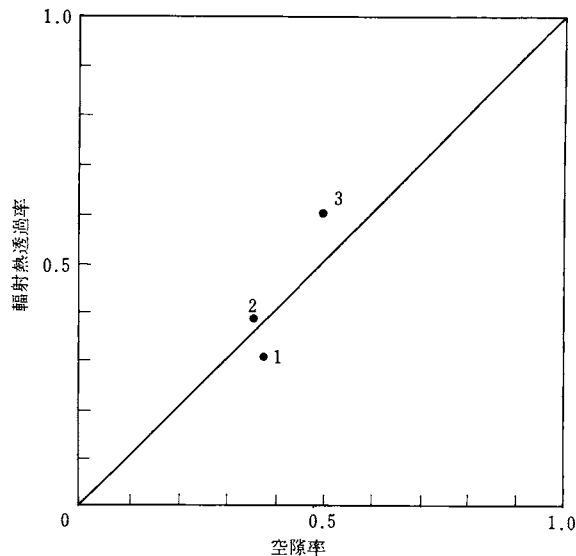


図-20 輻射熱透過率と空隙率の関係

4. 樹木の防風機能

有風下における樹木の防火機能を把握するには、防風機能の実態を明確にしておく必要がある。樹木の防風作用については防火樹林帯の設計あるいはビル風防止用の樹林の設計の必要性から、かなり研究されている。しかし、樹林防火を対象にした樹木の防風機能を取り扱った研究はない。

樹林・樹木は濾過性の固体障害物であり、高層建物の周辺にできるビル風とは異なる流れの場を作る。

樹木の防風機能が防火に役立つ過程を表-16に示す。

樹木の防風機能は輻射熱遮断、火の粉遮断と密接に関係し、防風作用の効果が高い程、他の機能も高くなる。

樹木が火災から十分離れている場合に、図-21(a)に示す通り熱気流は樹木の上方を流れる。一方、樹木が火災の近くにある場合には図-21(b)のように樹冠内部を通過するため熱気流温度低下機能が加わる。

室内実験により、樹木の風下の風速分布を測定した結果を図-22(a), (b), (c)に示す。供試樹木は

表-16 樹木の防風作用

1. 火炎及び熱気流を上方あるいは側方にそらす。
2. 風速の減少により火の粉が落下する。
3. 対流伝熱係数の減少により風下建物への伝熱量が減少する。
4. 強風下においては、風速の減少により消防隊の注水の効果を高める。
5. 炎の伸長を防止する。

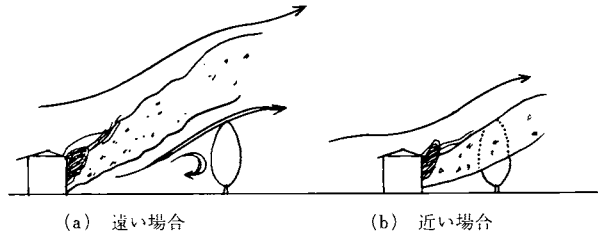


図-21 熱気流の拡散状況

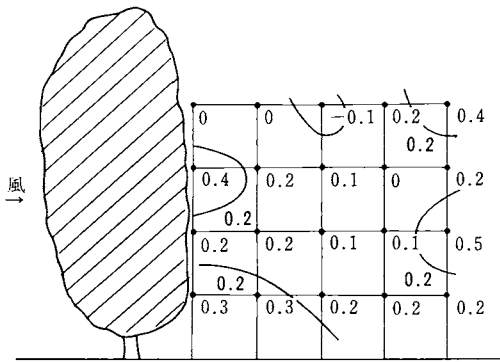


図-22 (a) 風速分布 (中心軸上)
 $v = 1.0 \text{ m/s}$

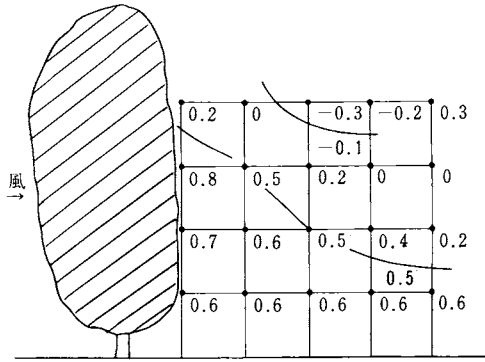


図-22 (b) 風速分布 (中心軸上)
 $v = 2.0 \text{ m/s}$

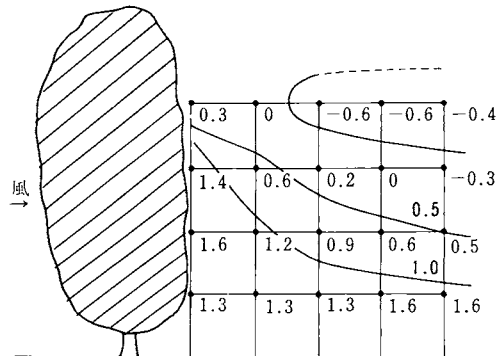


図-22 (c) 風速分布 (中心軸上)
 $v = 4.0 \text{ m/s}$

(樹種ツバキ、樹高2.7m、枝張り1.3m)
(測定箇所：高さと同距離0.5m毎)

ツバキで、高さ2.5m、葉張り150cm、で枝葉密度が90%以上のものである。この図は、風速を変えて樹木の中心の風下の流速分布を求めた結果を示している。樹木のすぐ上方あるいは側方においては部分的な箇所、風速が1～2割増加する区域もある。樹木の風下では風速が著しく減少する。樹木の風下では無風領域と逆流領域が生成する。その無風領域と逆流領域の生成する箇所は風速の大小によって異なり、風速が大きいく程、逆流領域が風下位置に形成され、その領域が下方に拡大する。床上50cmの高さまでは、枝葉がない(下枝高さ)ことから風速の減衰は小さい。

無風領域あるいは逆流領域が樹冠内部あるいは樹冠の風下端に接して形成されると予測していたが、その領域が樹冠の風下端から0.5m～1m離れた所に観測された。

樹木周辺の流れの場を更に明らかにするため赤い発煙筒を用いて調べた煙の拡散状況をカラーグラビア8と9に示す。写真のように樹木がない場合には煙の拡散幅は増加しないで流れるが、樹木があると煙の幅は広がり、それも主に下方に拡散していることがわかる。

これらの観測及び風速の測定結果から推定すると、樹木周辺の流れは図-23のようになる。①の流れは、樹木の上方をそれて流れるのに対し、②の流れは、樹冠部を通過し、下降気流になる。また、③の流れは樹冠の下方を流れ、樹木の背後に生じた渦の一部になっている。樹冠部を通る気流の温度が減少するのは、水蒸気の発生ばかりでなく、気流が側方及び上下方向に拡散することも関係する。

樹木の上方及び側方では、風速が1割程度増加するのはビル風の場合と類似していた。

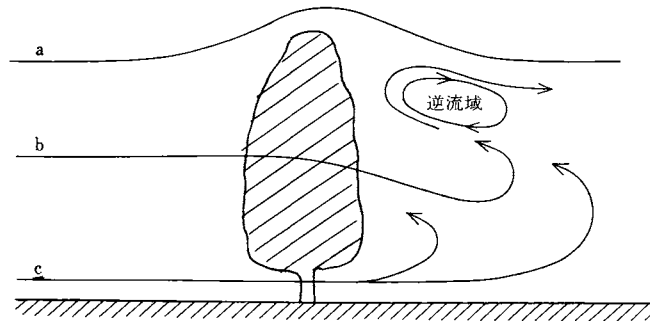


図-23 樹木周辺の流れ (中心軸上)

5. 樹木の気流温度低下機能

市街地大火において、避難路、避難場所の温度は人間が長時間耐えられる程度まで低くしなければならぬ。このため、避難場所に水噴霧を散布する方法も考えられている。避難場所の温度を低くするには、その位置が火災の風下に位置しないことが望ましい。たとえ、避難場所が運悪く風下に位置していても、火災からの距離が十分にあり、かつ、周辺に木造建物が少なければより安全である。避難場所の周辺には樹木が多く植えられておればこれらの樹林・樹木が避難場所の温度を下げる役目をする。

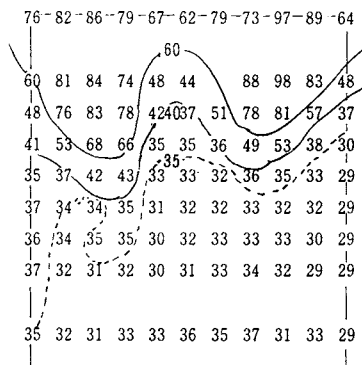
樹木は、火災によって生じた高温の気流を上方及び側方にそらすことによって風下の温度を減少させるばかりでなく、葉、枝、幹の昇温にあるいは葉に含まれる水分を蒸発させて、気流温度を低

下させる。

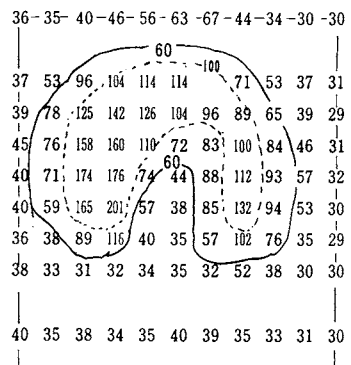
火災で生じた熱気流の拡散は、樹木の形状、本数などによって異なり、樹木が1本で縦に細長い場合には熱気流を上方よりもむしろ側方にそらす。また、樹木が火災正面に長く並んでいると、熱気流は側方よりも上方に流れる。樹木の風下では、樹木の熱気流をそらす作用と熱気流の温度を低下させる機能が加わって、気流温度が低下する。

樹木がある場合とない場合について、ヘプタン火災の風下2m地点における垂直断面内の温度分布を図-24(a), (b)に示す。樹木があると一般には気流温度は下がるが、場所によっては逆に高くなる箇所がある。樹木のすぐ背後では、気流温度は数度から数十度低くなるが、樹木の側方では、部分的に高くなっている。(a)図は、樹木を3本並べた場合で、このときには、60℃の等温線が20~40cm上方に移動した。(b)図は樹木が上昇気流を側方にまた、(a)図は上昇気流を上方にそらした。

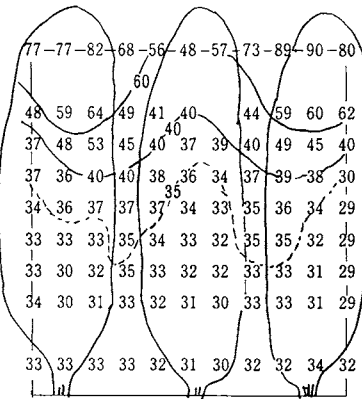
樹木による高温気流の温度低下機能を更に詳細に調べるため図-25に示す通り、風洞の上半部に樹葉をたばねておき、高温気流を流して樹葉のすぐ風下の気流温度を測定した。樹葉周辺の気流温度は時間変動をもち、かつ気流温度が測定箇所によっても異なるので、できる限り多くの地点の温度を測定するとともに樹葉を設置する前と後の温度分布を測定して、樹葉による正確な温度低下を求めた。



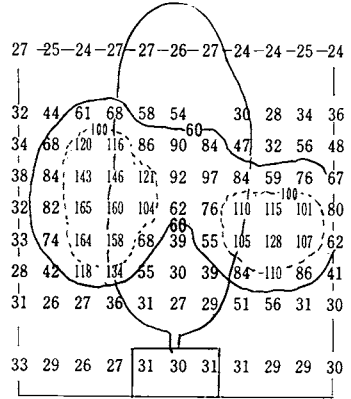
(樹木ナシ)



(樹木ナシ)



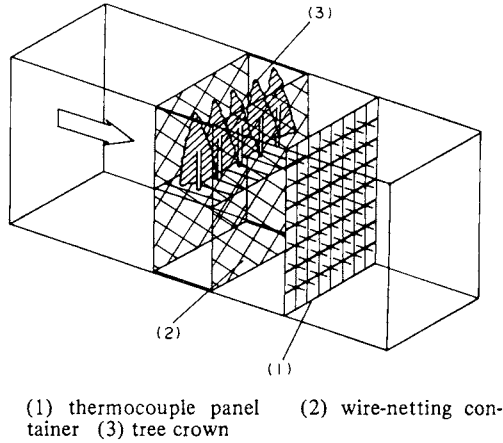
(3本の樹木)



(1本の樹木)

図-24(a) 温度分布の変化
V = 1.3m/s 樹木から2m風下

図-24(b) 温度分布の変化
V = 2.3m/s 樹木から2m風下



(1) thermocouple panel (2) wire-netting container (3) tree crown

図-25 樹葉による温度低下の実験

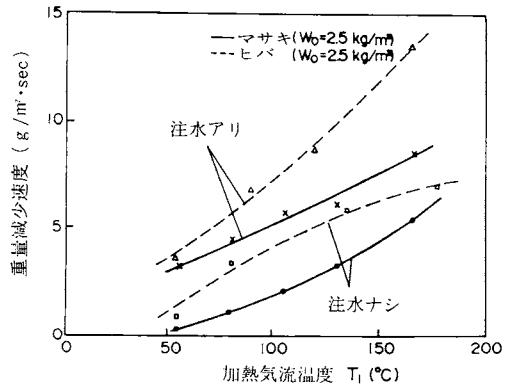


図-26 注水した樹葉の重量減少速度

実験の結果を表-17に示す。温度低下幅は、加熱温度が大きくなる程増加し、樹葉に予備注水しておけば、増大する傾向が認められた。樹葉に予備注水すると気流温度低下幅は注水していない樹葉の場合よりも2倍～4倍大きかった。この一連の実験により温度低下幅は樹葉の重量減少速度にも関係していることがわかった。注水した樹葉の重量減少速度を図-26に示す。注水した樹葉の重量減少速度は注水していない樹葉よりも大きく、その割合は、加熱温度が170℃のときには約1.5～

表-17 樹葉による気流温度の低下

(樹葉量 $W_0=2.5\text{kg/m}^2$)

| | | $T_1=55^\circ\text{C}$ | | $T_1=80^\circ\text{C}$ | | $T_1=105^\circ\text{C}$ | | $T_1=130^\circ\text{C}$ | | $T_1=165^\circ\text{C}$ | | |
|--------|----|------------------------|-------|------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|------|
| CASE A | 合板 | | -2.2 | 0 | -2.4 | 0 | -2.1 | 0 | -1.0 | 0 | +1.3 | 0 |
| | | | +12.4 | | +22.8 | | +32.6 | | +42.1 | | +56.5 | |
| | 樹冠 | 予備注水有り | -4.5 | 0.24 | -0.3 | 1.12 | -5.2 | 2.14 | -6.2 | 3.28 | -18.8 | 5.50 |
| | | 予備注水無し | -13.2 | 3.23 | -17.6 | 4.57 | -20.3 | 5.76 | -25.0 | 6.16 | -32.8 | 8.60 |
| | | +6.3 | | +15.5 | | +21.9 | | +26.5 | | +41.8 | | |
| CASE B | 合板 | | -3.7 | 0 | +10.2 | 0 | +15.3 | 0 | +20.5 | 0 | +21.5 | 0 |
| | | | +24.8 | | -40.7 | | -60.4 | | -67.1 | | -88.0 | |
| | 樹冠 | 予備注水有り | +1.3 | 0.87 | +2.2 | 0.57 | +4.1 | 0.68 | +5.7 | 0.98 | +11.4 | 1.79 |
| | | 予備注水無し | +0.6 | 1.82 | -0.1 | 2.42 | -1.1 | 2.78 | -1.0 | 3.98 | +84.0 | 4.26 |
| | | -22.0 | | -37.2 | | -55.0 | | -69.9 | | -2.0 | | |
| | | -23.9 | | -40.8 | | -53.4 | | -57.5 | | -80.0 | | |

\dot{M}^* : 重量減少速度 ($\text{g/m}^2\cdot\text{sec}$)

CASE A: 風洞の上半部に樹葉を置く 上段の値: 風洞上半部の温度変化
CASE B: 風洞の下半部に樹葉を置く 下段の値: 風洞下半部の温度変化

2倍であった。この割合は一般に加熱温度が小さくなるほど大きかった。

樹木の風下にある隣接建物の延焼箇所が気流温度 T_a の高温気に曝されたときの温度変化は次式で表される⁵⁾。

$$T - T_0 = (T_a - T_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \right) - \exp(-hx + h^2 \kappa t) \cdot \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} + h\sqrt{\kappa t} \right) \right\} \right] \quad (7)$$

この式を輻射熱で加熱する場合の(5)式と比較すると、輻射強度と熱伝達係数の比(R/α)が温度差($T_a - T_0$)にかわっていることがわかる。

これらの式から、延焼危険箇所が輻射熱と高温気流で同時に加熱される場合には、量 $[(T_a - T_0) + \frac{R}{\alpha}]$ の大きさが加熱の程度を表すと予想される。

6. 水蒸気の放出

樹木が火災から強い熱を受けると、樹木は水蒸気を放出する。この水蒸気は、上方あるいは風下に拡散して、風下の建物外壁から出る可燃性ガスと混合し、可燃性ガス濃度を薄めて隣接建物あるいは樹木の着火を抑制する。**カラーグラビア7**は、樹木が急に加熱された状態を示している。輻射熱が強い場合には樹木から水蒸気が著しく出る期間はわずか30秒～60秒程度で、その後は間もなく着火する。

水蒸気の放出速度は**図-4**から求まり、次式により気流温度の低下(ΔT)を推定することができる。

$$\Delta T = \frac{L \cdot W}{\rho c \Delta t} \times \frac{Q_1 - Q_2}{1 - Q_2} \quad (8)$$

上式で、 L は蒸発潜熱、 W は流れに直角方向の単位面積あたりの葉量である。たとえば**図-4(a)**のアオキについてみると、加熱温度の110℃の場合には加熱開始後1分～5分の間には65%から33%まで下がるから、流速を1 m/s、流れ方向の単位面積(m^2)あたりの葉量を3 kgとすると樹冠を通過する気流の温度低下幅は $c = 0.24$ 、 $\rho = 0.0013 \text{ g/cm}^3$ 、 $\Delta t = 240$ 秒を代入して(8)式より $\Delta T = 10.1$ ℃となる。

水蒸気の放出量が多い場合には、延焼着火を抑制し、高温気流の温度を低下させる働きをする。

7. 火の粉の遮断機能

樹木が火の粉の飛散防止に役立つことは酒田市大火からも明らかである。この火災では、海晏寺の墓地にクロマツやケヤキを主体にした樹林が火の粉の飛散防止に役立った。この場所の火の粉遮断状況について筆者らが聴取した結果を以下に示す⁶⁾。

初めは海晏寺の境内にいたが、お寺の屋根に火の粉が落ちてもお上がることができないので、下で消えればよいと見ているしかなかった。消えると「よかった、よかった」とひと安心した。墓会所に借りていたお寺(海晏寺)は床下が高く古い家なので床下に火の粉が飛び、枯れ葉が入っておりそれが燃えたらたいへんだと思い床下に入るのだけは気をつけた。中町あたりが燃えている頃に5～10cmの大きさの消しずみのまっ赤になったものが飛んできて、海晏寺の松の木にぶつかって花火のように散ったのでほうきでたたいて消した。その時刻は8時頃で西よりの風の時であった。あの辺には大きなお寺さんが六つあり、四つが続いて並んでいたもので、比較的安全だ

と思った。あの日は一晩中あっちの親戚、こっちの親戚とかけずりまわったので、今回の火事はかなり知っている。暮会所の玄関の戸が風でバーンと破れ、火の粉が家の中に飛び込んできた。そこでガラス戸を立て、入ってきた火の粉をたたいた。風で板キレの燃えたのが何百メートルも先に飛んでいた。風が強くて立っていると寄せられるので碁石のところ座っていた。10メートルの風どころではなく、猛吹雪の時のように火の粉が地面をはって、火の粉と炎でまるで火の海のようなようだった。

この証言のように火災の風下には火の玉と呼べる程の大きいものが飛散し樹木に衝突して花火のように散った。また、火の粉は強風下では、地面の上を吹き飛ばされて、地上を這い、これが床下の高い建物の内に入った。

樹木の火の粉遮断機能を分析すると表-18の通りである。樹木は火の粉の飛散を防止するばかりでなく、火の粉の着火能力を著しく低下させる。樹木の火の粉の飛散防止能力は、火の粉が大きい程、効果は高くなる。

樹木の火の粉の遮断状況を図-27に示す。火の粉の落下は樹木に衝突して落下する場合と、樹木の背後で風速が減少したために落下する場合がある。

表-18 火の粉の飛散防止

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 火の玉が当たって落下。 2. 木の背後で風速が弱くなって落下。 3. 地面上を通過してきた火の粉が植込などで補足される。 4. 火の粉が木に当たって細かく分散し、着火能力を弱める。 5. 木の葉に接触して火の粉の温度が低下する。 |
|---|

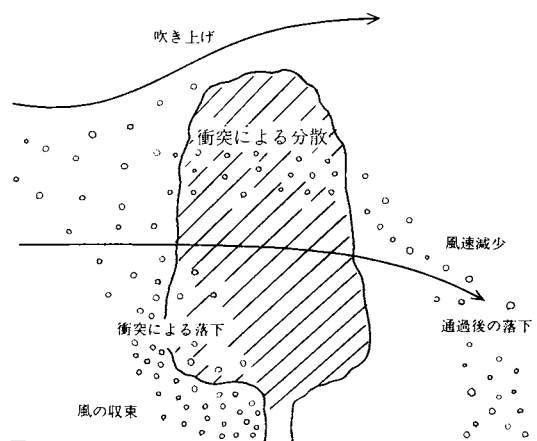


図-27 火の粉の遮断状況

8. 炎の伸長防止機能

樹木の防火機能は上に述べたように多くの機能から成り立っている。この他の機能として、炎の伸長防止機能をあげることができる。

有風下においては、自然風の乱れに加えて、燃焼によって起きる乱れが加わり、炎の長さは著しく伸縮する。火炎が伸びる場合には火炎の風下地点で輻射熱が急増するばかりでなく、気流温度も激しく上昇する。風下の隣接建物の外壁が焦げて着火する条件が備わっている場合には、接炎によって火炎が伸びた瞬間に着火するため、火炎の伸長は延焼に対して決定的影響をもつ。

樹木は自然風の乱れ及び燃焼によって生じた気流の乱れを抑えて、火炎の伸縮をなくする働きをする。また樹木は短い時間ではあるが、火炎の温度を低下させ、フレイム・アレスターとしての働きもする。

樹木の風下の火災環境の乱れ（輻射熱，気流温度，流速）は輻射熱あるいは気流温度にも表われ，その変動が非常に小さくなる。

図-28は樹木の風下に細い熱電対を置いて，気流温度の変化を測定したものである。樹木があると気流温度が低下するばかりでなく，その変動が小さくなる。

火災の乱れの減少は図-9の輻射熱の変動の低下としても表われる。

樹木が燃え出すと気流温度の変動は増加するが，燃え出さない限りにおいては，樹木は流速の乱れを抑制して，着火する確率を著しく減少させる。

樹木の防火機能は，樹葉の状態変化によっても異なり，表-19に示すとおり，樹葉が炭化した場合には，水蒸気放出機能は失われるが，輻射熱遮断機能は焼失しない限り保有する。樹木の輻射熱遮断機能が非常に優れているのは，上記の点にも関係する。

樹木が燃え上がる場合には，防火機能を失うばかりでなく，火の粉を発生させて飛火の発生を助長するので，散水などにより燃焼を抑制することにより延焼防止効果を向上させることが可能である。

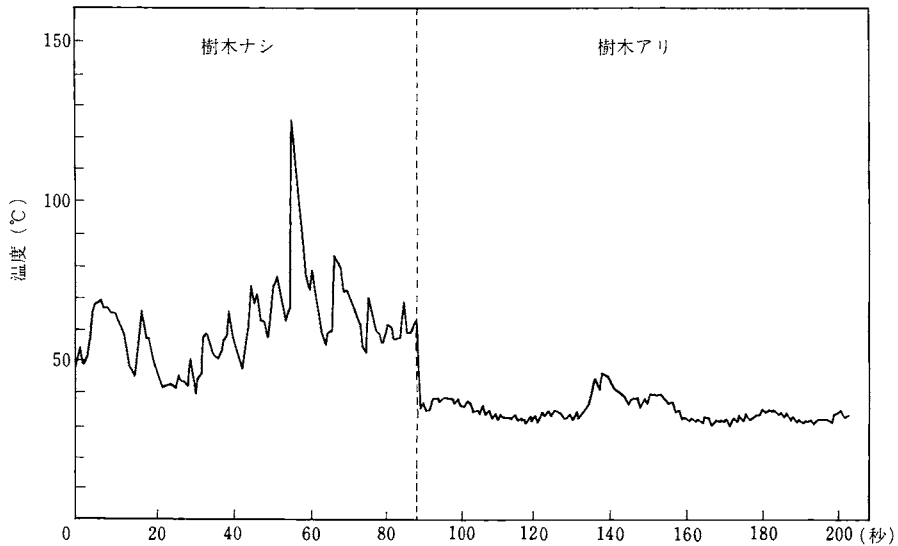


図-28 樹木による温度変化（点線以降樹木のある状態）

（ヘプタン火炎風下の気流温度） S=2,0m, H=1.6m

表-19 防火機能の変化

| 樹葉の変化 | 輻射熱遮断 | 防 風 | 水蒸気放出 | 熱気流温度 低 下 | 火の粉遮断 |
|-------|-------|-----|-------|--------------|-------|
| 変化なし | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 変 色 | ○ | ○ | × | × | × |
| 炭 化 | ○ | ○ | × | × | × |
| 燃焼・焼失 | × | × | × | × | × |

○：機能有り

×：機能無し

9. まとめ

- (1) 有風下においては、樹林、樹木の周辺に強風域、弱風域、逆流域などの複雑な流れの場が形成されて、火災で生じた熱気流はこの流れに左右される。樹冠を通過する高温気流は樹木によって上方あるいは側方にそらされ、樹冠を通過した気流の温度は低下する。樹冠を通る気流は一般に下降気流となる。
- (2) 樹木の防火機能は、輻射熱遮断、防風、気流温度低下、水蒸気放出、火の粉遮断、火炎の伸長抑制などの機能からなり、強風下火災では、樹木の火の粉遮断機能が大きい。
- (3) 樹木は断続的に接近する火炎に対して短い時間であるがフレーム・アレスターの役割りを果し、火炎の伸長を抑制する。

参考文献

- 1) 小野寺卯, 増田久夫, 石川政章: 防風林周辺の防風効果について 林業試験場報告 第80号 (1955)
- 2) 石川政幸: 林内の風について 林業試験場報告 第64号 (1953)
- 3) 新田伸三, 東集成, 石井昭夫: 環境緑化における微気象の設計 鹿島出版会 (昭和56年)
- 4) 東京都防災会議: 大震災時広域避難場所の現況調査と適地選定に関する調査研究 (昭和50年)
- 5) 安全工学協会編: 安全工学講座1 火災 海文堂 (昭和58年)
- 6) 消防研究所: 酒田市大火の延焼状況等に関する調査報告書 (昭和51年)

第4章 水幕の延焼防止効果

1. 研究目的

雨が降ってきて市街地大火がおさまった例はどの程度あるだろうか。昭和28年の大館市大火では雨のために鎮火したといわれるが、このような例は極めて稀で、市街火災で延焼中に雨が降り出して火災が鎮火した例は少ない。昭和51年の酒田市大火では、出火前後から1時間に1～2mmの雨が降って、火勢を幾分弱めたものの、鎮火させるには至っていない。昭和58年4月27日の久慈市の林野火災では火災の3日目にして雨がパラツキ、残火整理に役立った。

火災の鎮火に必要な降水（注水）量は火災の種類（市街地火災、林野火災等）と火災周辺の熱的環境によっても異なる。市街地火災の延焼防止には1時間に100～600mmの大きい降水量が必要で、風が治まって雨が降り出す状態にならないと1時間に数ミリ程度の雨では鎮火は期待できない。火災の防御を効果的に行うには延焼防止に必要な注水量を決定しておくことが必要である。この章では、水噴霧による輻射熱遮断機能、樹木へ予備注水したことの効果、隣接建物の外壁に連続注水したときの温度上昇抑制効果を調べ延焼防止に必要な水量を明らかにすることを試みた。

樹木に注水して樹木の燃焼を防止し、間接的に樹木背後の建物を防御する場合を想定して、樹木への放水の効果についても検討した。

2. 研究の現状

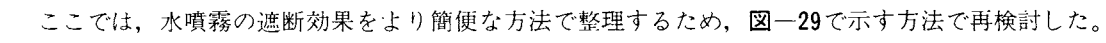
岡島ら¹⁾は、ドレンチャー設備の基準を求めるため、延焼防止に必要な注水量を実験により求めた。水噴霧による輻射熱遮断については中田・山下²⁾、上野・島ら³⁾、松川・小島ら⁴⁾の研究があり、水噴霧の粒径が小さい程、遮断効果は高いことが指摘されている。中田・山下は輻射熱透過率と水幕のみかけ上の厚み（ Qd/v ）の関係を調べた。これらの実験により、水幕が輻射熱を遮断する効果のあることは確認されているが、効果の程度についてはかなり異なっている。

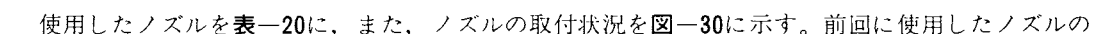
松川・末吉らは、避難場所の安全を確保することと消防隊員の安全を守ることを目的にして、水噴霧の散布量と気流温度低下の関係を調べた。その結果避難場所に100cc/m²分の水噴霧を散布すれば、気流温度を70℃から34℃まで低下させることができると報告した。

3. 水噴霧による輻射熱遮断機能

水噴霧から構成される水幕は、輻射熱を吸収、散乱させ、水幕背後への輻射伝熱量を減少させる。輻射熱を吸収した水噴霧はその温度が上昇し、一部は蒸発する。水噴霧の輻射熱遮断効果は水噴霧の粒径、流速、水噴霧の厚さばかりでなく、輻射熱源の温度にも依存する。

筆者らは、前報において、水噴霧の見かけの厚み（ Qd/v ）と輻射熱透過率の関係を求めた。この方法では、水噴霧の流速を決定するにあたってどの値を代表値に選ぶかで問題が残った。

ここでは、水噴霧の遮断効果をより簡便な方法で整理するため、—29で示す方法で再検討した。水噴霧の注水速度を測定するため、床上に細長い容器〔深さ3cm×幅7cm×長さ250cm〕を置いて、これを傾けた状態にして、1分間あたりの注水速度を求めた。

使用したノズルを表—20に、また、ノズルの取付状況を—30に示す。前回に使用したノズルの

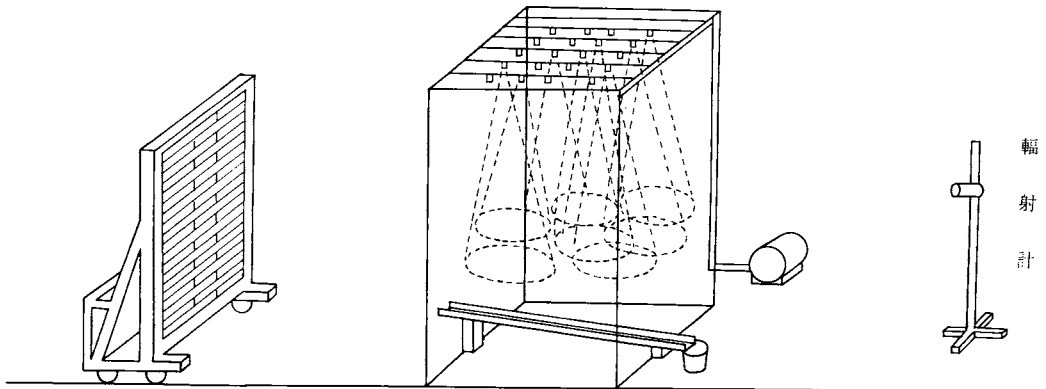


図-29 水幕による輻射熱遮断実験

表-20 ノズルの種類

| ノズル | 特徴 |
|---------------------|--------|
| $\frac{1}{4}$ E×25 | 粗粒 |
| $\frac{1}{4}$ S8080 | 粗粒 |
| 農薬散布用ノズル | 粒径が小さい |

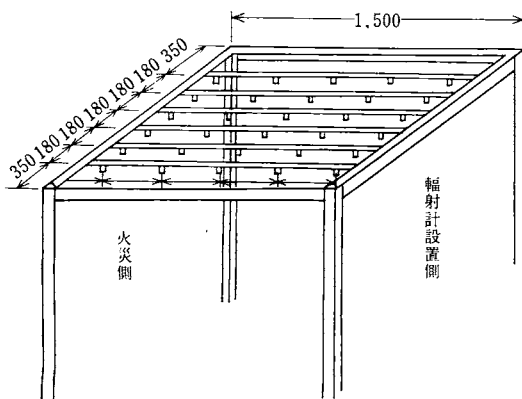


図-30 散水装置（噴霧ノズルの取付）

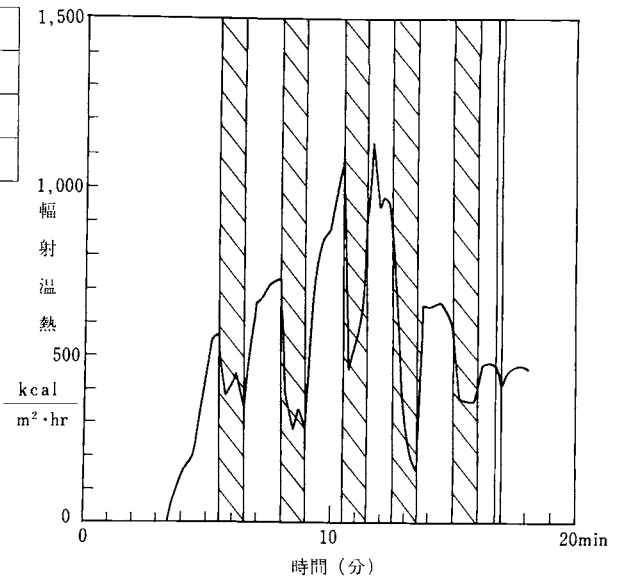
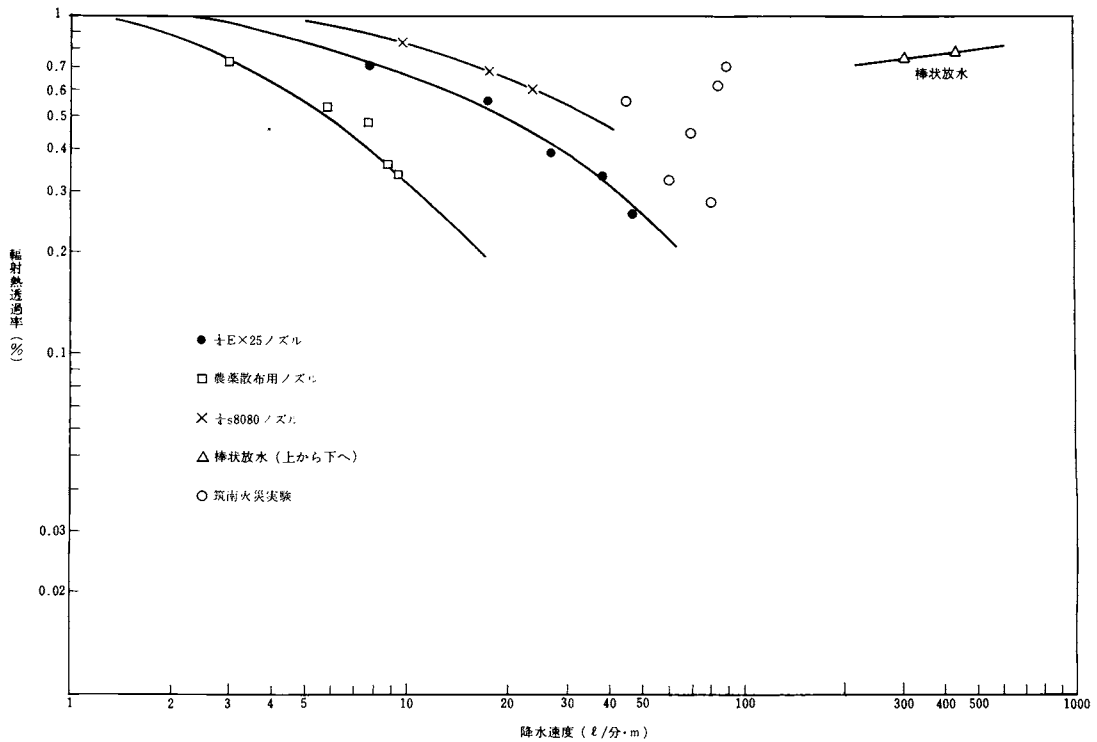


図-32 輻射熱の時間変化

他に粒の小さい噴霧を発生するため、農薬散布用の噴霧ノズルも用いた。この農薬用の噴霧ノズルから形成した水噴霧の粒径は約0.1mm程度のもので、粒径はほぼ一定であった。

実験の結果を図-31に示す。農薬用の噴霧ノズルを用いた場合には、少ない水量でも効率よく輻射熱を遮断している。ノズル $\frac{1}{4}$ EX 8080、 $\frac{1}{4}$ EX 25のノズルでも水幕の輻射熱透過率は異なったものになった。また、パイプにつけた直径5mmの穴(図-30の5行×6列の個数)から棒状注水の形で放水したときの結果を△印で示す。棒状注水の場合には輻射熱遮断効率が非常に悪い。

昭和56年の10月、筑南消防本部主催の火災実験で消防研究所も協力して水幕ホースの輻射熱遮断実験を行なった。供試建物は木造平屋住宅で建物から8m離れた地点に水幕ホースをセットし、水圧を変えて、水幕を形成し、輻射熱の遮断率を測定した。この時の水圧と流量を表-21に示す。水



図一31 水幕の輻射熱透過率

表一21 水幕形成時間

(水幕ホース長さ10m)

| | 形 成 時 間 | ポンプ圧 (kg/cm ²) | 水 圧 (kg/cm ²) | 流 量 (ℓ/分) |
|-------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|--------------|
| 予備実験 | 12:15~ 12:16 | 10 | 8 | 700 |
| 第1回水幕 | 1:20:30~1:21:30 | 5 | 4 | 450 |
| 第2回水幕 | 1:23:00~1:24:00 | 8 | 7 | 600 |
| 第3回水幕 | 1:25:30~1:26:30 | 10 | 8 | 700 |
| 第4回水幕 | 1:27:30~1:28:30 | 13 | 11 | 800 |
| 第5回水幕 | 1:30:10~1:31:00 | 14 | 12 | 850 |
| 第6回水幕 | 1:31:50~1:32:00 | 15 | 12.5 | 900 |

幕ホースの長さは規格上20mのものであるが、便宜上一部を閉めて、長さ10mのホースとして使用した。実験はポンプ圧が5kg/cm²の状態では1分間水幕を形成し、輻射熱の透過率を測定した。また一定時間水幕を停止した状態で、火災の輻射熱を測定し、水圧を変えて同じような測定を繰り返した。

この実験における、A₄観測点（建物から24m離れた地点）の輻射熱の時間変化を図一32に示す。この図で斜線区間は水幕を形成している時間帯である。水幕を形成したことにより、輻射熱が著し

く低下したのがわかる。

この実験で得られた輻射熱の透過率と水噴霧の降水量 (Qd) の関係を図-31の△印で示す。筑南火災実験の場合には、水幕 (10m) の単位長さ (1m) あたりの流量は多くても、室内実験の場合よりも輻射熱の遮断率が低かった。これは、水幕の高さを確保するため、水幕ホースでは上方に向けて棒状注水しているが、輻射熱透過率が大きいのは棒状注水は輻射熱の遮断に殆ど寄与していないことにもよる。

実大規模の火災実験は、有風下で行われるのが普通であり、この時の風の乱れが、火噴霧の拡散状況を支配し、輻射熱遮断率を低下させる一因にもなる。

図-31において、Qdの単位は $\left[\frac{\ell}{\text{分}\cdot\text{m}}\right]$ である。この単位は降水量Q $\left[\frac{\text{mm}}{\text{分}}\right]$ に水噴霧の幅 [m] をかけた値になる。このため、 $Q = 5 \frac{\text{mm}}{\text{分}}$ 、 $d = 10\text{m}$ の場合には $50 \ell/\text{分}\cdot\text{m}$ となる。

樹木と水幕を利用して輻射熱の遮断率を考えてみる。樹木と水幕の輻射透過率をそれぞれ τ_T と τ_W とし、併用したときの透過率を τ とすると次の関係が得られる。

$$\tau = A \times \tau_T \times \tau_W \text{-----} (9)$$

この式でAの値は一般に1よりも大きくなり水噴霧の拡散あるいは粒径の変化に関係する。

水幕と樹木と併用すると水噴霧の風による拡散が弱まるばかりでなく、水噴霧が樹木に衝突して粒径が更に細くなるため、熱遮断率は高まる。

水幕と樹木を併用したときの輻射熱の透過率を図-33に示す。この併用による輻射熱の遮断効率の向上は、噴霧状の注水のときよりも棒状注水で顕著であった。

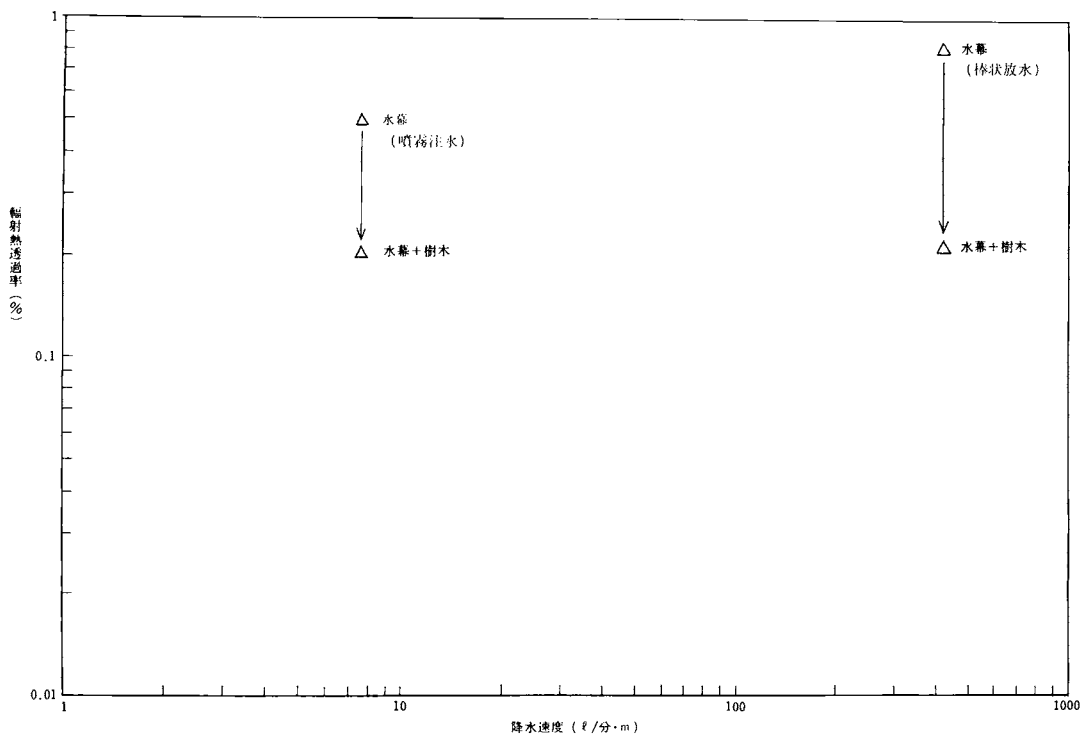


図-33 樹木と水幕併用による輻射熱透過率 (樹木だけの輻射熱透過率 41%)
(樹木は同じであるが注水方法を変えた場合の実験)

放水で延焼防止を図るにあたって、放水の射程距離を長くすることと、延焼防止効果を高める（水噴霧の粒径を小さくする）ことはいずれも大事であるが、これらは一般に対立する関係にある。

樹木に放水する場合、樹木は棒状注水を噴霧注水にかえる働きをしており、上記の矛盾を解決する。

4. 予備注水の有効時間

街区火災において火災が接近すると、消防隊は炎上建物に放水して消火を図る外に隣接建物の外壁に注水して延焼防止活動を行う。火災から十分に離れた地点では、住民が水道水を屋根あるいは外壁にかけて延焼防止を行うが、これらの予備注水は飛火の発生防止に役立つ。樹木に注水すると葉が濡れるため火の粉の飛火着火能力を著しく低下させるとともに地上の枯れ草の燃焼を防止するのに役立つ。

注水を一時停止したときの予備注水の効果は外壁への付着水量の大小に依存する。この点を明らかにするため木造建物の外壁に注水した場合、どの程度の水が付着するのかを求めるための実験を行った。ベニア板を建物に立てかけ、これに5 m離れた地点から、150 l /分の流量で注水（棒状、噴霧）した。この結果を図-34に示す。棒状注水を行った時の付着水量は噴霧注水よりも多くかつ、概略注水時間が長い程増加した。棒状注水で注水時間が3分程度のときは、200 g /m²程度の水が外壁（ベニア板）付着した。この付着水量は、一般に外壁表面の粗さなどによって異なる。

上の結果のように注水量の殆どは流下し、付着した量は注水量の1%にもみまない。この程度の付着水量であれば、火災が接近し輻射熱が急増するときには、付着した水の蒸発（有効）時間はわずか数十秒しかない。

建物外壁に比較して、樹木では、多量の水が付着することが予想される。樹木は、多くの葉と小枝、幹を含み、樹葉の面積は大きく、立体的に配置しているため、樹木への付着水量は増大する。各種の樹木について、葉を含んだ小枝を切り取ってその重量とそれに十分に噴霧注水したとき

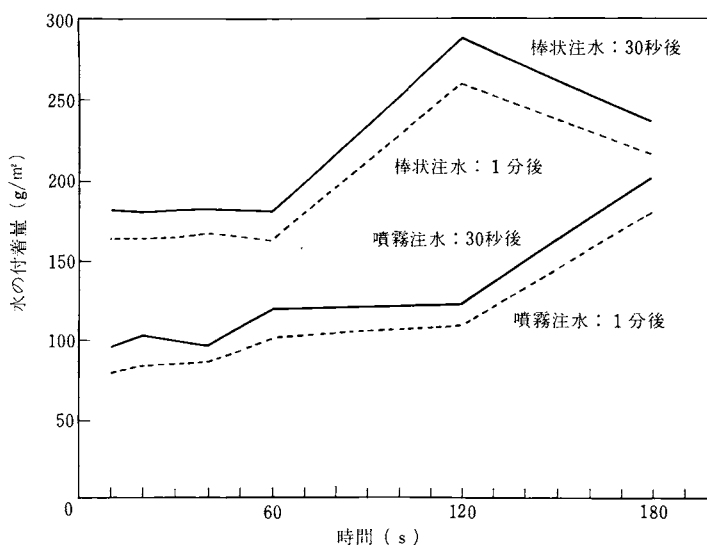


図-34 垂直面（ベニア板）の付着水量

の付着水量の関係を図-35に示す。小枝の重量が大きければ大きい程、付着水量は増加している。ユーカリの付着水量は他のものより小さい。一般にこの図から小枝の重量の4～5割の重さだけ、水が付着することがわかる。

各種の樹木の樹葉について、厚さ及び単位面積あたりの付着水量を表-22に示す。クスノキの葉1枚では、付着量（葉の裏表の両面を含める）は12.5mg/cm²であり、これは単位をかえて示すと125g/m²となる。この値はベニア板の場合に比較すると、葉への付着量の方が少なかった。この表によるとサワラ、ヒノキなどの針葉樹で付着水量が多く、予想外の結果となった。針葉樹が加熱された

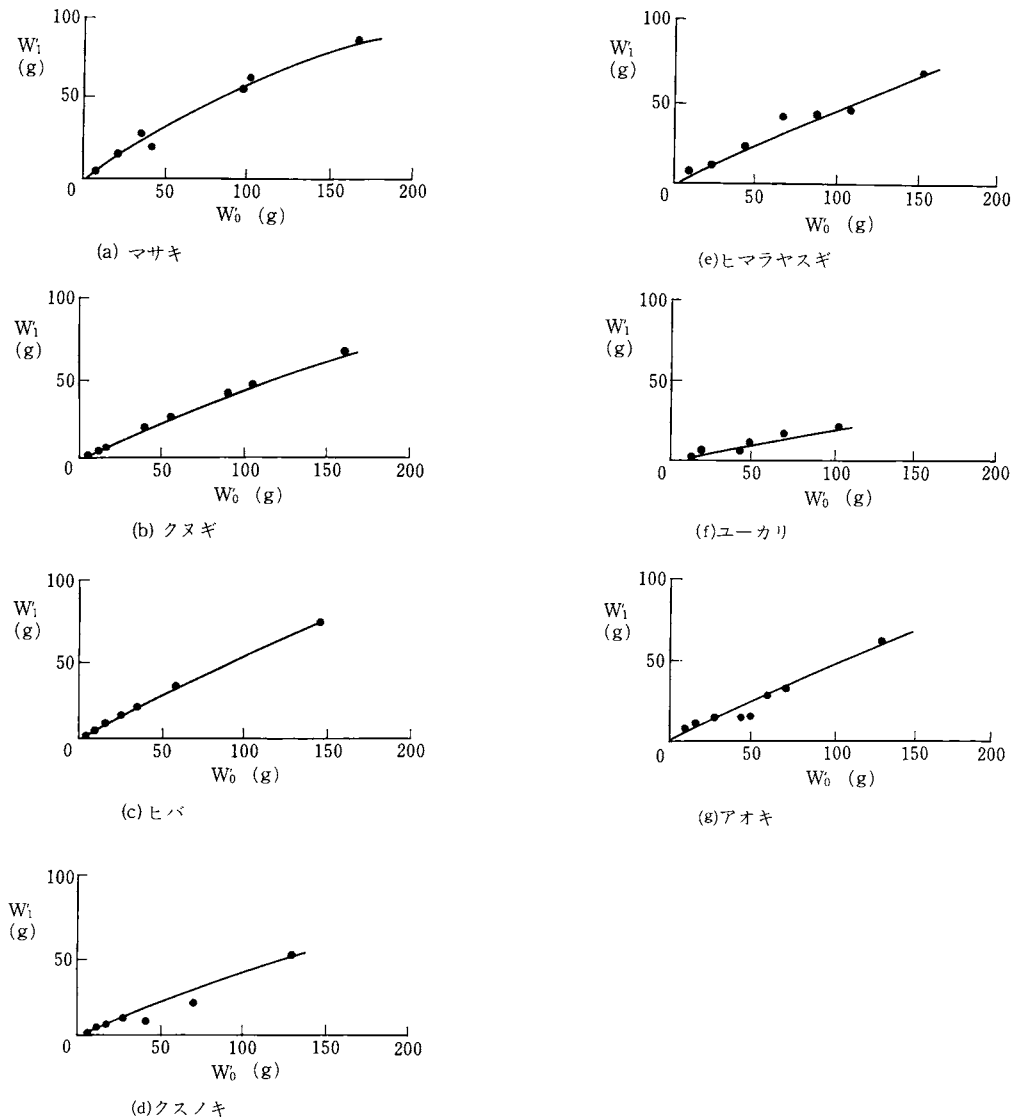


図-35 各種樹葉への付着水量
(種々の重さの小枝に注水した場合)

表—22 各種樹葉の付着水量（葉の裏と表に付着したもの）

| 樹種 | 厚さ(mm) | 重量 | 付着水量 |
|-------|---------|------------------------|-----------------------|
| クリノキ | 0.11 | 11.3 $\frac{mg}{cm^2}$ | 7.8 $\frac{mg}{cm^2}$ |
| サクラ | 0.8~0.9 | 59.7 | 38.6 |
| クスノキ | 0.15 | 17.5 | 12.5 |
| サンゴジュ | 0.415 | 55.4 | 16.0 |
| ユーカリ | 0.25 | 45.4 | 13.1 |
| アオキ | 0.28 | 42.3 | 16.5 |
| ツバキ | 0.34 | 46.5 | 21.5 |
| ウメ | 0.12 | 14.1 | 18.1 |
| サクラ | 0.12 | 16.6 | 13.2 |
| モッコク | 0.61 | 57.7 | 32.3 |
| ヒイラギ | 0.40 | 40.5 | |
| サザンカ | 0.32 | 33.0 | 14.6 |

| 樹種 | 厚さ(mm) | 重量 | 付着水量 |
|---------|--------|-------|-------|
| マキ | 0.47 | 89.7 | 48.8 |
| マツ(1本) | 0.72 | 240.0 | 27.8 |
| ヒマラヤスギ | 0.79 | 182.0 | 364.0 |
| マキ | 0.47 | 58.7 | 52.2 |
| ヒノキ(小量) | 0.69 | 147.1 | 180.7 |
| カシノキ | 0.40 | 22.1 | 11.4 |

ときの乾燥速度は大きく、燃焼し易いといわれる。しかし樹木に注水する場合には、多くの水を含むことになるため、針葉樹も防火性が劣ることなく延焼防止に役立つ。

樹木に注水すると、樹木は幹、枝、葉に含まれる水分の他に多量の付着水を保有する。水分の保有量は葉に含まれる分を含めると水をかけていない場合と比較して7~10割増となる。

予備注水された樹木が火災にあうと、初めは付着水のみが蒸発して、樹葉の昇温は抑えられる。樹木に輻射熱で加熱すると、加熱側の表面のみが変化して内部は殆ど変化を受けることはない。このことは注水した樹木でも、樹木の加熱側表面の樹葉に付着した水が初めに蒸発し、次いで表面の樹葉が加熱され変色する。この段階でも樹冠内部は多量の水を含んだ状態として残る。

ほぼ同じ大きさの小枝について、一方は予備注水したもの、他方は予備注水しないものを使って輻射熱を加えたときの重量変化を図—36に示す。

注水した小枝の初期重量は付着水を含んでいるため大きい値となっているが、加熱されると速く減少する。同じ輻射熱の場合には、注水した小枝の重量減少速度は注水しないものより約2倍大きい結果となった⁵⁾。この結果は、高温気流中における樹葉の重量減少速度の結果とほぼ一致している。

樹木に予備注水したときの注水有効時間について考えよう。加熱を開始してから樹木に付着した水量だけ重量が減少するまでの時間（図—36に示す△印の時刻）を有効時間と考えて、種々の大きさの樹木に対する有効時間の測定結果を図—37に示す。この図の横軸は、樹木投影荷重と呼ぶべき量で樹木を側面に投影したときの単位面積あたりの樹葉（小枝を含む）重量である。この値は葉張り単位体積あたりの枝葉の重量などに関係する。樹木投影荷重が大きくなると、付着水量も増大して有効時間が長くなる。また、輻射熱が弱くなると有効時間は急激に伸びる結果となった。

以上の結果のように、樹木に注水した場合には、樹冠に含まれる水分は7~10割増加し、加熱されると、約2倍以上の水蒸気を放出して樹木を守る働きをする。

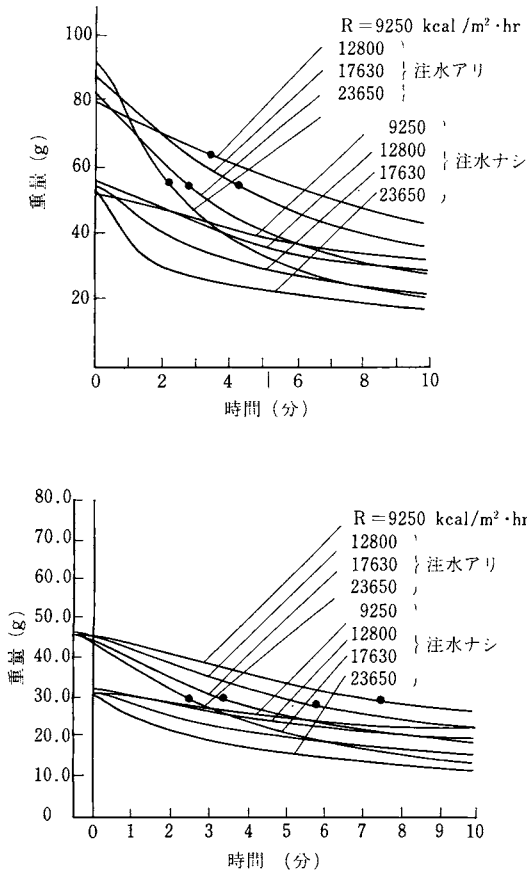


図-36 加熱による樹葉の重量変化（付着水を含む）

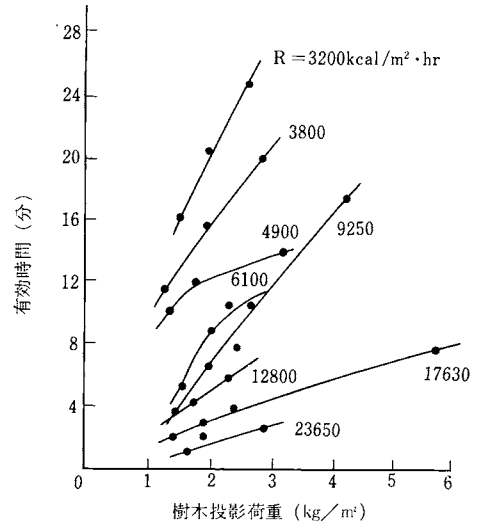


図-37 有効時間

5. 噴霧注水による温度上昇抑制効果

火災の周辺にある可燃物に連続注水することは、注水を一時停止する場合よりもはるかに高い延焼防止効果をもつ。可燃物表面に付着した水滴は輻射熱を吸収して可燃物への伝熱量を低下させ、加熱物の温度上昇を抑制する。水噴霧散布による温度上昇抑制効果を調べるため、シュバンク・バーナーの前方に2種類の可燃物（一方は連続注水したヒノキ材、他方は注水しないもの）を置いて加熱しながら温度を測定し、注水による温度上昇抑制効果を求めた⁶⁾。熱電対を可燃物の加熱側表面付近に設置し、それを試料温度とした。一定時間（12分間）加熱したときの試料温度の上昇値（注水しないもの）と放射強度の関係を図-38に示す。輻射熱が強い場合には、試料温度上昇値もほぼ比例して上昇した。

一方、注水する試料について、加熱開始12分後の試料温度を、横軸に放射照度、縦軸に注水速度の図に示したものを図-39に示す。輻射熱が強い条件下でも、水噴霧の散布速度を大きくすることによって試料温度を低く抑えることができた。図中の2つの曲線は、試料温度を110℃、及び150℃以下に抑えるに必要な注水速度を表す。また、点線は、タンク火災において、延焼防止のために隣接タンクを冷却するのに必要な注水速度を示す。試料の近くに別の炎を近づけた場合、試料温度が150℃以

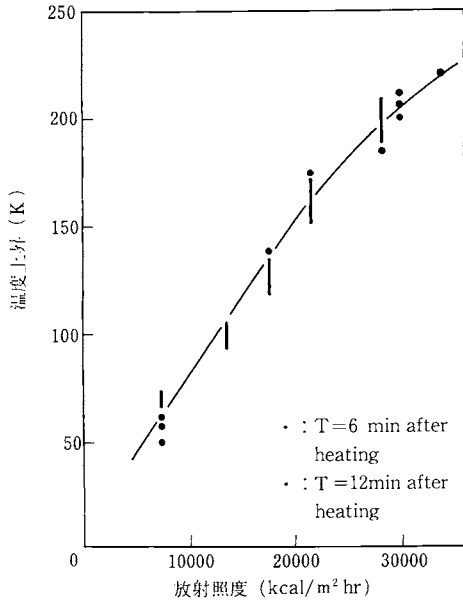


図-38 放射照度と温度上昇の関係

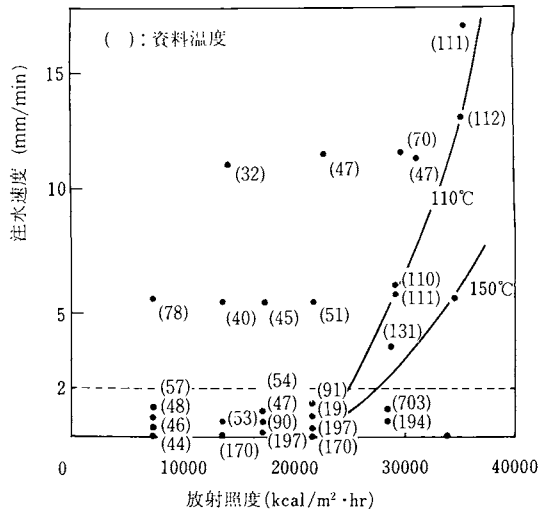


図-39 注水時における角材の温度上昇

上になると容易に着火(接炎)した。試料温度が150°Cになることは接炎着火の一つの目安である。水噴霧を可燃物に連続的に散布することは、水噴霧が輻射熱の一部を吸収し、残りの輻射熱を可燃物に伝達しているとして理解することもできる。

この考えに基づき、連続噴霧注水の輻射熱透過率を用いて求めた。

$$\beta = \frac{R}{R_0} = \frac{\text{注水によって低下した温度に相当する放射照度}}{\text{注水する試料を加熱する放射照度}} \quad (10)$$

この式の分子の放射照度は、注水によって低下している試料温度から図-38により求めたものである。このみかけ上の透過率が小さい程、水噴霧による温度上昇抑制効果は大であることになる。

実験によって得られた見かけ上の輻射熱透過率を図-40に示す。この図の数値は注水速度を、また5本の曲線は注水速度がそれぞれ0.1, 0.5, 1, 5, 10mm/分の場合を表す。

水噴霧の注水速度が小さい場合には、輻射熱の大小によって、温度上昇抑制効果が大きく異なる。一方、注水速度が大きい場合には、温度上昇抑制効果は高く、この値は輻射熱の大小に余り依存しない。

延焼防止のために注水するとき、注水速度が大きければ大きい程効果は高い。しかし、注水速度が大きくなると無駄水が増えて、使用した水量の割には効果が上がらない。図-40において、注水速度を示す曲線が接近する場合には、注水速度を増加しても温度上昇抑制効果が上がっていないことを示す。輻射熱が小さい場合、注水速度を5mm/分から10mm/分にかえても、無駄水が多くて効果があがらない。

水噴霧の温度上昇抑制効果は、水噴霧の付着の仕方、付着した後の水の流れ方に左右され、様々な条件下の実験データを更に整えることが必要である。

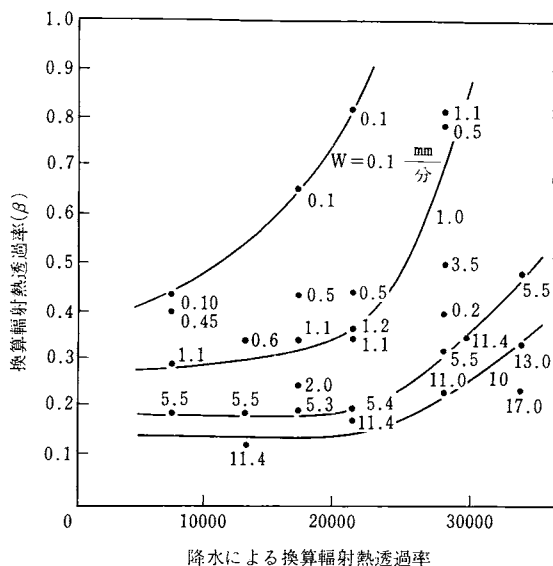


図-40 降水による換算輻射熱透過率

6. 樹木の着火・燃焼防止に必要な注水速度

ヘプタン火炎の風下に樹木を置き、これに連続的に注水する条件下で、火炎と樹木との距離をかえ、着火・燃焼防止に必要な注水速度を求めた。実験の結果を表-23に示す。

この実験の結果では、気流温度が400℃の地点では、9.8mm/分以上の注水量が、また、気流温度が300℃の地点では、1.9mm/分以上の注水量が必要であった。

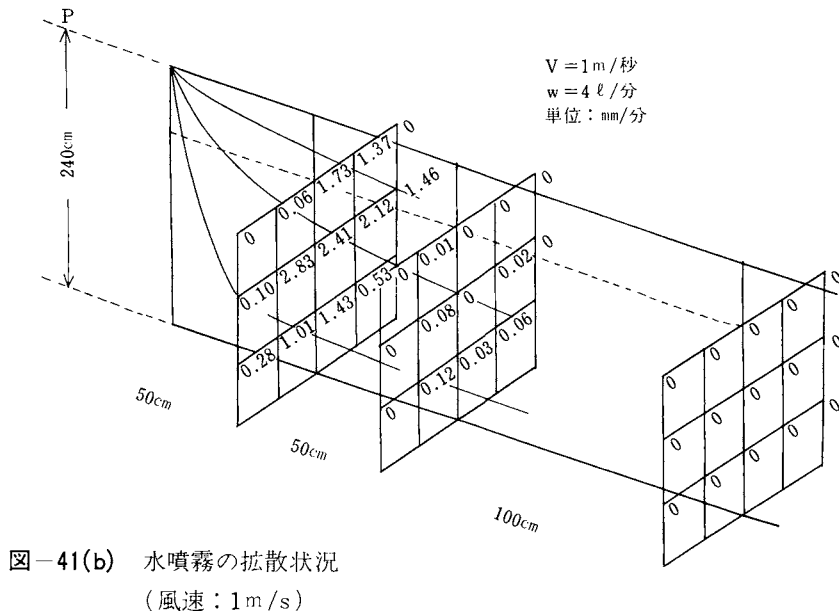
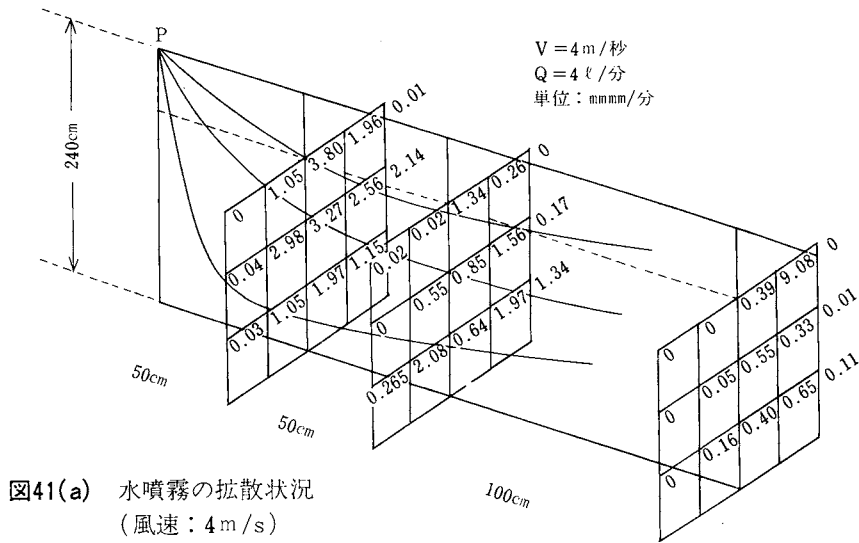
また、この種の実験により、針葉樹であっても広葉樹に対する値と同じ速度の注水があれば燃え上がることはないことが確かめられた。

表-23 注水による着火防止

| 距離 | 風速 | 放射熱 | 温度(最高) | 注水の有無 | 降水量 | 着火の有無 | 樹木 |
|-------|------|---|--------|-------|---------|---------|-----|
| 150cm | 1.0% | 6000 $\frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}}$ | 150℃ | 有り | 0.9mm/分 | 無し、燃えない | ツバキ |
| 100 | 1.0 | 14000 | 400 | 有り | 1.0 | 有り、燃えた | ツバキ |
| 150 | 1.0 | 6000 | 150 | 有り | 4.2 | 無し、燃えない | ヒバ |
| 100 | 1.0 | 14000 | 400 | 有り | 9.8 | 無し、燃えない | ヒバ |
| 75 | 1.0 | 17000 | 550 | 有り | 1.9 | 有り、燃えた | ヒバ |
| 100 | 1.0 | 14000 | 400 | 有り | 1.9 | 有り、燃えた | ヒバ |
| 125 | 1.0 | 10000 | 300 | 無し | — | 有り、燃えた | ツバキ |
| 125 | 1.0 | 10000 | 300 | 無し | — | 有り、燃えた | ヒバ |
| 125 | 1.0 | 10000 | 300 | 有り | 1.9 | 有り、 | モチ |
| 50 | 1.0 | 20600 | 665 | 有り | 9.6 | 無し、燃えない | モチ |

7. 水噴霧の拡散状況

風速が 1 m/s と 4 m/s の場合について、水噴霧を上から下に放出する場合の水噴霧の拡散状況を 図-41(a), (b) に示す。水噴霧の拡散量はナプキン（生理用）に含まれている吸水剤を空間に立体的に配置して測定したものである。風が強くなると水噴霧は風下に多く拡散しているのがわかる。一方水幕装置の風下に樹木があれば水噴霧の拡散状況はわかり、大部分は樹冠部の表面に付着して滴下して、樹冠内部には浸透しなかった。このため、樹木のすぐ風下にある可燃物に付着量は予想外に少なかった。



8.まとめ

- (1) 水幕の輻射熱遮断効果は、水噴霧の粒径が小さい程効果が高くなるが、風に流され易い欠点をもつ。このため、有風下における火災の延焼防止に当っては、その効果と射程距離を考えて粒径の小さいものと大きいものをつくるノズルを使用するかあるいは種々のノズルを組み合わせで使うのがよい。
- (2) 水幕と樹木を併用する場合、針葉樹の葉には広葉樹よりも一般に多くの水が付着するため、針葉樹は焼え易いという欠点を解消できることが確かめられた。これは市街地にあるすべての樹木を枝葉密度が高ければ樹種に関係なく、火災防御に利用できることを示す。
- (3) 水幕と樹木を併用する場合には、地上の枯れ草の燃焼が阻止されるとともに樹木の火の粉遮断効果を著しく向上させる。

参考文献

- 1) 岡島慶三郎, 矢治頼夫: 流水膜による延焼防止の実験的研究 (第1報) 日本火災学会論文集 Vol. 2, No. 1(1952)
- 2) 中田金一, 山下邦博: ウォーター・スプレーによる放射の減衰について 消防研究所報告 第34号 (1971)
- 3) 上野宰, 島光男ら: 水幕による熱遮断実験結果について 消防科学研究所報告 (1978)
- 4) 松川渉, 未吉道夫: 水噴霧による防護方法の研究について 消防科学研究所報告 No11(昭和49年)
- 5) 山下邦博, 笠原保信: 予備注水による樹木(マサキ)への延焼防止に関する実験的研究 消防研究所報告 第54号 (1982)
- 6) 山下邦博: 水噴霧の冷却作用に関する研究 消防研究所報告 第58号 (1984)
- 7) 山下邦博: 樹冠内を流れる高温気流の温度低下に関する研究 消防研究所報告 第55号

第5章 水幕と樹木の併用による 延焼防止向上効果の観測

樹木と水幕の併用による延焼防止向上効果を図-42に示す装置(表-7の実験Bと同じ)で測定した。供試樹木はツバキで樹高2.7m,枝張1.5mのものである。この樹木を側面に投影したときの空隙率は約10%以下のものである。

熱源はヘプタン火炎, 燃焼容器は60cm×60cmでその風下1mの地点に樹木を置き,水幕は床上240cmの高さから下方に水噴霧を4ℓ/分の速さで散水した。

樹木の背後に5本の角材を立て,各角材の床上60cm,120cm,180cmの高さの気流温度と角材温度(加熱表面)を測定した。温度測定点はボールの番号と高さで示し $P_1(60)$, $P_2(60)$, …… $P_5(180)$ で表した。角材はヘプタン火炎から1.5mの風下位置とした。

有風下火災に対する樹木の延焼防止効果は,延焼着火危険箇所の高さ,中心軸からの距離によって異なる。このため延焼防止効果の空間分布を求めるには多くの観測点が必要である。

実験は以下の4つのケースについて行った。樹木がない場合(CASE1)を基準にして,樹木と水幕を個々に使う場合あるいは併用することによって各地点の温度が何度まで低下するかを測定した。実験は次の4つのCASEについて行った。

- CASE 1 障害物なし
- CASE 2 樹木あり
- CASE 3 水幕あり
- CASE 4 樹木と水幕あり

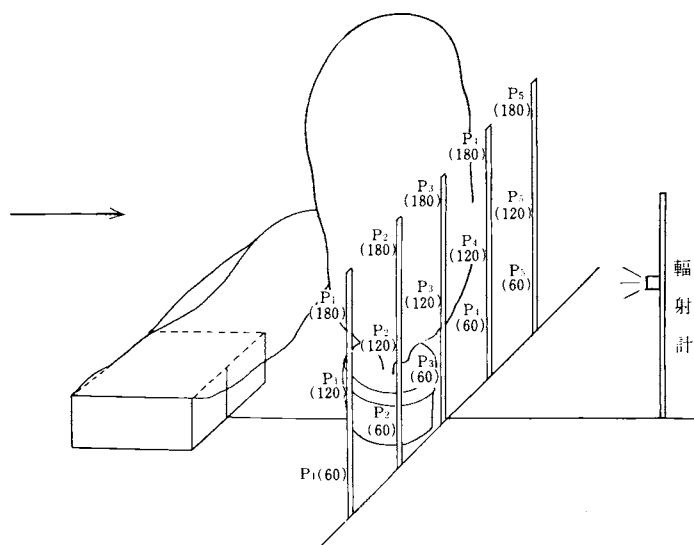


図-42 実験装置 (角材はヒノキで40mm×40mmのもの)

各地点の角材の温度は、その地点の輻射熱と気流温度に支配される。各地点の気流温度及び輻射熱は樹木がない状態でも異なるものであるが、樹木があることによって各地点の熱的環境は更に異なったものとなる。

観測点P₂(180)、P₂(120)について、CASE 1～4の温度（気流、角材）変化を図-43に示す。気流温度は実線で、角材温度は点線で表した。気流温度は時間変動が大きいのにに対し、角材温度は変動が少なかった。

基準状態（CASE 1）に比較して、樹木がある場合には、点火直後1～2分間は気流温度と角材温度の減少が認められるが、5～6分経過すると樹木の一部が燃えて、温度の上昇速度が大きくなった。水幕がある場合（CASE 3）にも角材の温度上昇が抑制されているのがわかる。CASE 4の場合には角材の温度上昇が著しく抑制された。CASE 2、3、4についてCASE 1と比較することにより各地点の角材の温度上昇（初期値との差）から温度上昇率（温度上昇抑制の程度を表わす）を次式を用いて求めた。

$$\eta = \frac{T - T_0}{T_a - T_0} \quad (11)$$

上式でT_aはCASE 1の角材の温度（特定の時刻）でT、T₀はそれぞれ障害物を前方に置いたとき（CASE 2、3、4）の角材温度と初期温度である。ηの値が0に近い程、効果が高い。

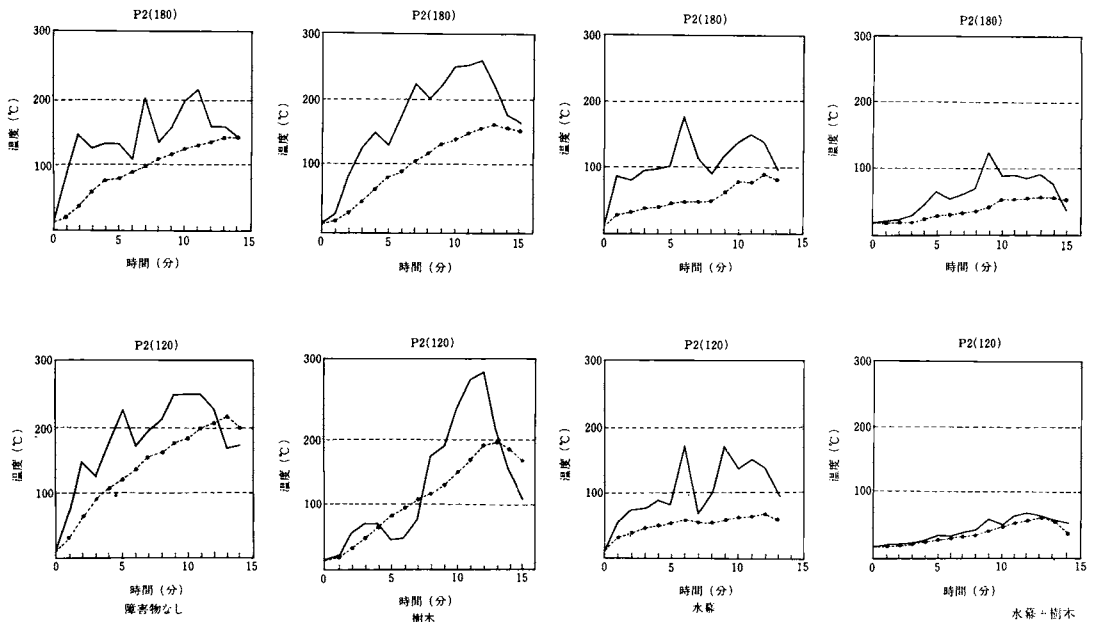


図-43 角材温度及び気流温度の時間変化
（ヘプタン火炎の風下1.5m、風速1.0m/s）

点火後2, 6, 10分について, CASE 2, CASE 3の温度上昇率を図-44(a), (b), (c)に示す。温度上昇率が1よりも大きくなっているのは, 樹木があることによって逆に温度が上昇したことを示す。温度上昇率が1よりも大きくなる箇所は熱気流主軸の側方である。

この図から, 樹木だけによる温度上昇率は0.5~1.0で床上高さが高くなる程効率が小さくなっている。また, 時間の経過とともに温度上昇率が低下しているが, これは樹木の一部が燃えたことと水蒸気放出能力が下がったことによる。水幕と樹木がある場合(CASE 4)では, 温度上昇率は0.1~0.2となり, これは樹木の空隙率に近い値を示した。

樹木の温度上昇抑制効果は次の熱流束 Φ の減少の程度に依存する。

$$\Phi = R + \alpha (T_a - T_0) \text{ ————— (10)}$$

樹木があることによって, 隣接建物の延焼危険箇所(地点)の輻射熱 R と気流温度は減少し, 熱伝達係数 α も下がる。

(10)式は輻射伝熱と対流伝熱によって可燃物が加熱されるとき熱流束を表す。実際の火災においては, この値は時間的に著しく変動するし, 対流伝熱と輻射伝熱の割合もかわる。

樹木があることによって生じる熱環境の変化(輻射伝熱と対流伝熱の減少)から, 樹木の背後にある可燃物の温度を予測することが可能であるし, 逆に, 可燃物の温度から熱環境の変化の概要を知ることができる。

CASE 4の場合, 樹木のまうしろにある P_3 の地点では, 気流温度は約 $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{1}{3}$ に, 輻射熱は $\frac{1}{5}$ ~ $\frac{1}{10}$ まで減少していた。特に $P_3(60)$ 地点をみると輻射熱は $\frac{1}{10}$ に, 気流温度は $\frac{1}{2}$ 程度まで減少している。(10)式において $\alpha = 20 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{deg}$ として Φ の変化を予測すると熱流束 Φ は約 $\frac{1}{10}$ に減少しており, この値は角材の温度上昇率(CASE 4)にほぼ対応している。

地点 $P_3(60)$ のように輻射加熱支配になる地点の温度上昇率は(2)式からも推定できるように樹木の空隙率となる。

水幕による温度上昇抑制効果は樹木と異なり, 第4章で説明した通りである。水幕を利用したときの温度上昇率をみると, 水のかかる箇所においては効果が顕著に表れ, 時間の経過とともに向上する。しかし, 水のかからない地点が生じて, そこでは, 温度上昇率が高い値をとる。

水幕と樹木を併用する場合, 水噴霧の大部分は樹冠部に付着して, その背後にある可燃物に殆どかからない。それにもかかわらず, 温度上昇率が小さくなるのは, 樹木及び水幕の輻射熱遮断機能と気流温度低下機能が高いためである。

水幕と樹木を併用することの利点は, 水幕によって樹木の燃焼を完全に防止し, 樹木の防火機能保持時間を火災の全期間に延長することができる点と, 広い空間領域が安定して火災から防御される点にある。

以上の結果は, 樹木を火炎に接近して置いた条件下の実験から得たもので, 水幕と樹木の併用効果が非常に大きかった。

(6)式において, 輻射熱 R のかわりに熱流束 Φ を代入することにより, 可燃物の表面温度の時間変化の予測の可能性について検討した。CASE 4の場合について, 樹木と水幕によって減少した熱流束 Φ と可燃物の温度上昇値の時間平方根に対する比 $\frac{T - T_0}{\sqrt{t}}$ の関係を図-45に示す。この図から, 両者には比較的よい相関があることがわかった。

水幕

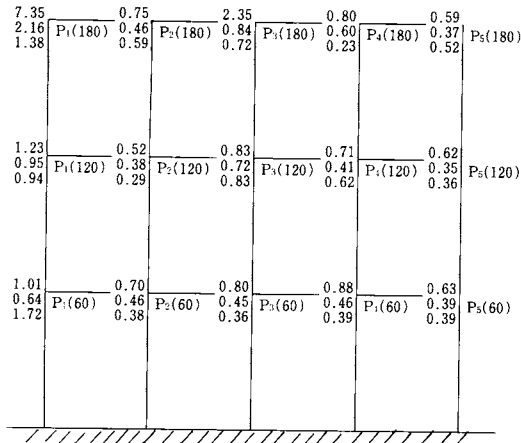


図-44(a) 温度上昇率
(水幕)

樹木

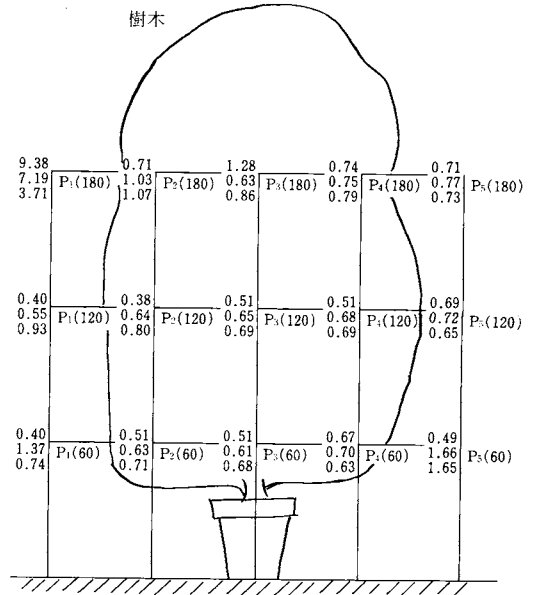


図-44(b) 温度上昇率
(樹木)

樹木 + 水幕

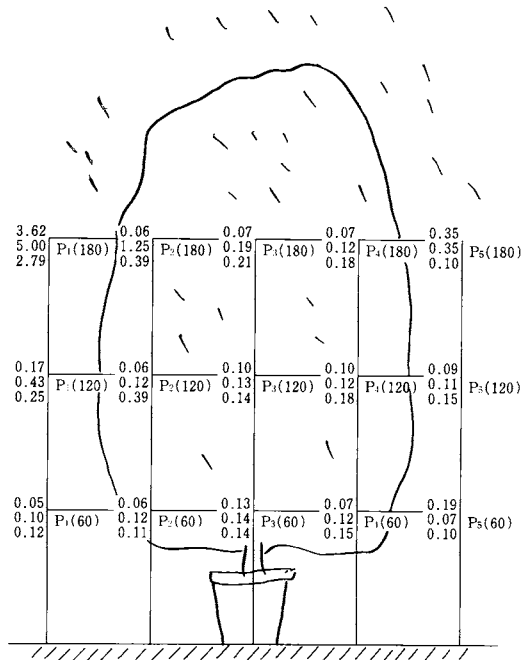


図-44(c) 温度上昇率
(水幕 + 樹木)

(各地点の数値は2分、6分、10分後の温度上昇率を示す)

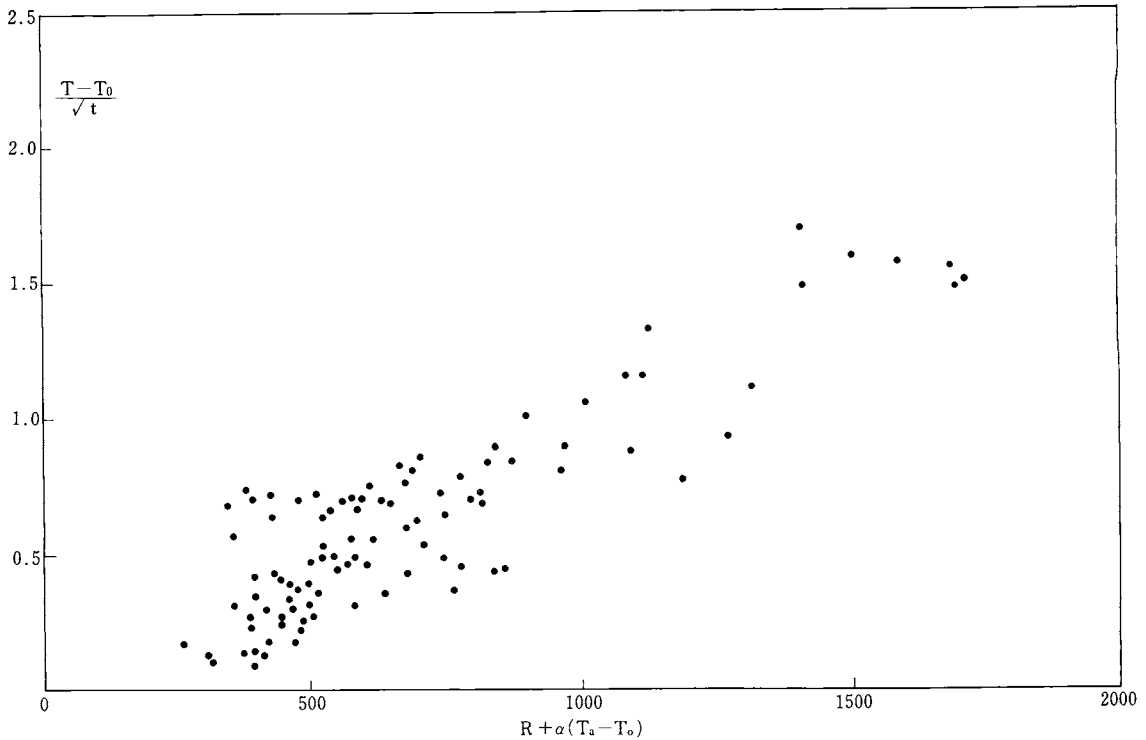


図-45 角材の温度上昇値と熱流束の関係

樹木と水幕の併用による温度上昇抑制効果は表-24に示すように延焼防止効果の一つの側面であるが、極めて基本的な効果である。

樹木に注水して、樹木の燃焼を防止している様子をカラーグラビア10に示す。たとえ、樹木に注水しても、火炎が集中して樹木の一部分を加熱する場合には水があまりかかっていない箇所を選んで燃え上がるが、火炎が集中する箇所を重点的に注水すれば樹木の燃え上がりを完全に防止できる。この場合、注水方向を火炎の進行方向に一致させることによって、より有効に着火防止が可能である。水噴霧がかからない箇所を選んでみえ上ったときの樹木の燃焼後の様子をカラーグラビア11に示す。

表-24 樹木と水幕併用による延焼防止効果の現れ方

| | |
|--------|------------|
| 輻射熱遮断 | 可燃物の温度上昇抑制 |
| 気流温度低下 | |
| 火の粉遮断 | |
| 水蒸気放出 | 着火の抑制 |
| 火の粉遮断 | |
| 輻射熱遮断 | 燃焼の抑制 |
| 気流温度低下 | |
| 水蒸気放出 | |
| 火の粉遮断 | |

樹木に噴霧注水する場合、噴霧は樹冠部の表面だけに付着し、内部には殆ど侵入しなかった。棒状注水では噴霧注水よりも樹冠内部への水の浸透が多くなるため樹冠部全面を濡らすには棒状注水の方が適している。

まとめ

樹木と水幕を併用することによって、樹木の風下にある可燃物の温度上昇を抑制するとともに樹木のフレームアレスターの機能が格段に向上し、強風下において効果的な防火帯を作ることができる。

第6章 水幕(散水)装置付き防火樹帯

火災時において、樹林・樹木を楯にして消防隊は消火活動を行い、条件によってはそこを防御線とすることができる。樹林に囲まれた道路、広場は避難道路・避難場所として利用され、樹林の利用度は高い¹⁾

防火だけを目的にして設置された樹林帯（防火樹林帯）は全国的にみても殆どないと思われるが火災時において樹林帯が防火機能を最高度に発揮できる条件を明らかにし、それに添って樹林帯を設計し管理するのが望ましい。

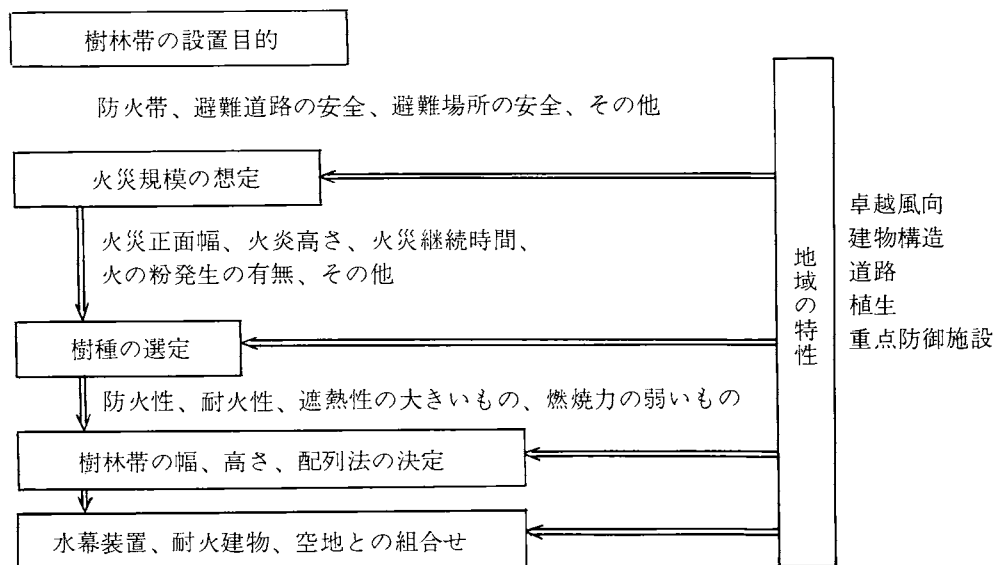
水幕設備付き防火樹帯を設計するには、表-25に示すとおり火災の規模（街区火災、あるいは市街地大火）を想定し、地域性を加味して、延焼防止に必要な樹林帯の構成（樹種、樹帯幅、樹帯高さ、他の延焼防止要因との組合せ）を決めればよい。

樹林帯の設計上の留意点を表-26に示す。これは各章のまとめの項で示した事柄を念頭に入れ、防火帯予定地周辺の特異性を分析した上で、他の延焼阻止要因（水幕装置、耐火建物、空地など）と組合せることが望まれる。

防火樹帯の設計には火災の性状を把握することが先決となる。火災環境は、

- ①無風下、弱風下
- ②強風下、烈風下

表-25 水幕装置付き防火樹帯の設計



- 高木、中木、低木の組合せ
- 炎が集中する所の耐火性を特に高める。
- スキマをなくす

表-26 水幕装置のある防火樹帯の設計上の留意点

| | 目 標 | 留 意 点 |
|------------------|----------------------------------|--|
| 樹 林 帯 | 耐火建物、空地、地形などを上手に組み合わせて、防火帯を作る。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. イチョウのように落葉樹でも防火力の強いもの、または、できる限り防火力の強い常緑樹を使う。 2. 葉が厚くて、含水率の高いものは防火力が一般に高いので、これらの樹木を防火樹として使う。 3. 防火力の高い低木や上木を組み合わせ、複数列に植えて防火力を高める。 4. 枝葉密度の高い樹木を火災側に並べる。 5. 防火樹帯周辺の建物の不燃化を進める。 6. 樹帯内の地上の枯れ草、落葉を除去しておく。 7. 付着水量の多い樹種をえらぶ。 |
| 水 幕 装 置 | 強風下においても風下方向への延焼を防ぐことの可能な防火帯を作る。 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 炎が集中的に接触する箇所に水噴霧を集中させるように設計する。 2. 強風、烈風下でも樹林全体に水噴霧がかかるようにする。 3. 粒径の小さいもの、大きいものを上手に組み合わせるようにノズルを選択する。 4. 防御する建物にも拡散した水がかかるようにする。 5. 使用した水を溜めて再利用し長時間使えるものとする。 6. 樹冠内部にも水噴霧が侵入できるものとする。 |

で全く異なる。無風下、弱風下であれば、火災の延焼速度も小さいし、また、防御にあたって包囲体形をとることが可能である。これに対して、強風下、烈風下では、火災の拡大も速く、火災の風下では、濃煙と熱気のため消防隊は接近できず、結果として火災の拡大を許すことになる。酒田市大火のように平均風速が15m/s近くにも達する烈風下においては、高圧状態にして棒状注水を行っても吹き飛ばされて、有効注水にならなかった。

強風下、烈風下の火災では、延焼防止に必要な防火帯の幅は、

① 風上側、風横側

② 風下側

で大きく異なる。

火災の風横・風上では幅員が5～6mという樹林をもたない狭い道路でも防御できるが、風下側では幅員が20mの道路でも防御できない。

消防隊の接近ができない場合があることなら、火災の風下側では水幕器具・装置として固定設備が望まれる。この場合ノズルの取付位置は、図-46及びカラーグラビア10に示すように、火災が集中して樹木に接する箇所とする。また、散水した水を採取して再利用するのがよい。

防火樹帯の幅が30～40mも必要な場合でも、十分な水幕（散水）装置があれば、幅は半分で間に合う。この場合の必要注水量は第4章で求めた結果を使えばよい。

防火樹帯の設計にあたっては、その地域の卓越風向を明らかにしておくことが必要である。弱風の場合には風の方向は一般に一定しないが、強風・烈風下においては、特定な気圧配置が絡んでいることが殆どであり、卓越風向も決まる。強風・烈風の卓越風向に対して直角方向の防火樹帯の幅

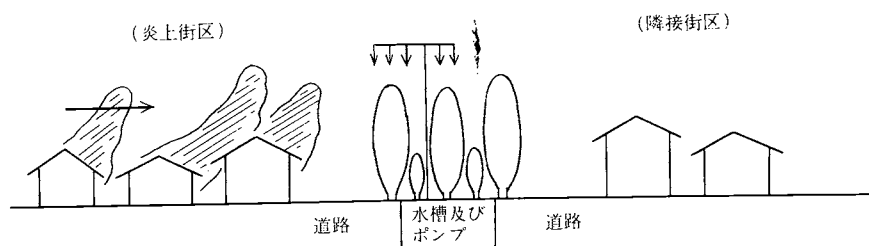


図-46 注水装置を備えた防火樹帯

は大きくとる必要がある。

高橋、福島²⁾は広域避難場所の安全を調べるため、過去のデータをもとに樹木の防火性を整理し群落の防火性の検討方法を示した。その結果の一例を図-47に示す。

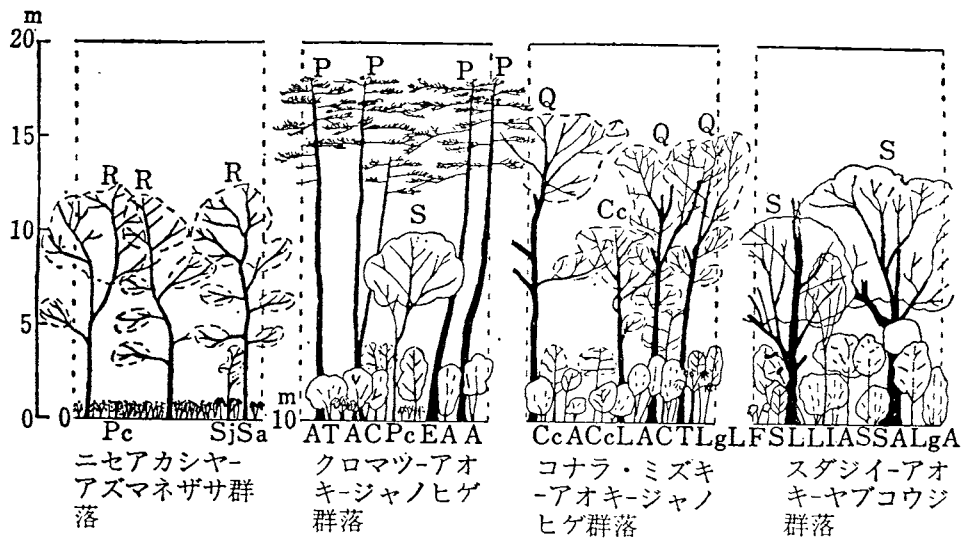
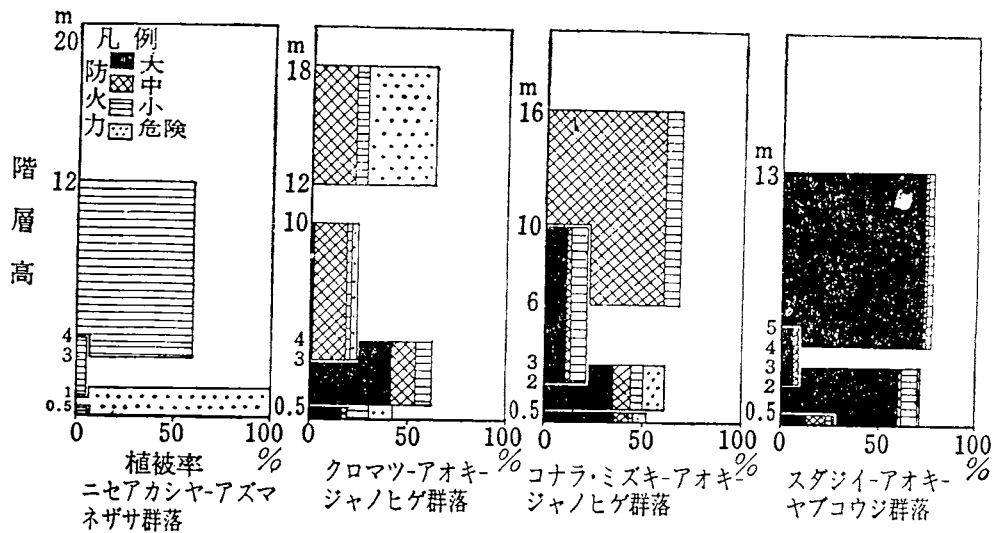
彼等の分析方法は防火帯の設計にあたっても有用である。

彼等の作成した一覧表に常緑と落葉の区別及び高木と低木の区別をつけ加えたものを表-27に示す。

防火樹帯のスキマをなくすため、あるいは弱点箇所をなくすために防火性の高い高木と低木を上手に組み合わせることが必要である。水幕装置が備わっているときには、針葉樹であっても防火性が劣ることはないが、水利が不足する場合も想定し、樹種として常緑の広葉樹を選べばよい。

参考文献

- 1) 建設省：都市防火対策手法の開発報告書（昭和57年12月）
- 2) 高橋啓二，福島司：大震災時の広域避難場所における植生の防火機能と調査方法について 森林立地 21（1980）
- 3) 東京都都市計画局：都市，防災施設計画調査資料集(2)（昭和53年12月）
- 4) 紺野昭：防災緑地計画の実際（明日の緑を考える）防災と緑地 日本緑化センター
- 5) 岩河信文：都市における樹木の防火機能に関する研究 建築研究報告 No.165（1984）
- 6) 原口雅人：長時間火災における樹木の防火性に関する研究 筑波大学大学院修士課程環境科学研究科修士論文（1985）
- 7) 高原栄重：都市緑地の計画 鹿島出版会（昭和55年4月）



A: アオキ, C: イヌシデ, Cc: ミズキ, E: ヒサカキ, F: ヤツデ, I: モチノキ,
 L: ネズミモチ, Lg: シロダモ, P: クロマツ, Pc: アズマネザサ, Q: コナラ,
 R: ニセアカシヤ, S: スダジイ, Sa: クマザサ, Sj: エゴノキ, T: シュロ

群落側面図

図-47 群落の階層構造と防火力 (高橋, 福島による)

表-27 植物の防火性

(高橋・福島の作成した表に常緑・落葉等の区別を付した)

| 防火力 | 既往文献による区分 | 推定による区分 |
|-----|---|--|
| 大 | <p>アスナロ(常緑高木)、イヌマキ(常緑高木)、コウヤマキ(常緑高木)、コウヨウザン(常緑高木)、スダジイ(常緑高木)、アカガシ(常緑高木)、シラカシ(常緑高木)、タブノキ(常緑高木)、ヤブニッケイ(常緑高木)、モチノキ(常緑高木)、クロガネモチ(常緑高木)、ネズミモチ(常緑低木)、シャリンバイ(常緑低木または小高木)、カナメモチ(常緑小高木)、ヤマモモ(常緑高木)、タラヨウ(常緑高木)、ツバキ類(常緑高木)、サザンカ(常緑小高木)、モッコク(常緑高木)、サカキ(常緑小高木)、シキミ(常緑小高木)、キョウチクトウ(常緑低木)、サンゴジュ(常緑低木)、マサキ(常緑低木)、ヤツデ(常緑低木)、ユズリハ(常緑高木)、ヒメユズリハ(常緑高木)、カラタチ(落葉低木)</p> | <p>ニオイヒバ(常緑高木)、ヒワ(常緑小高木)、マルバシャリンバイ(常緑低木)、カクレミノ(常緑小高木)、シロタモ(常緑高木)、チャ(常緑低木)、ジンチョウゲ(常緑低木)、ツルグミ(常緑低木)、ナワシログミ(常緑低木)、ムベ、ビナンカズラ、キズタ、オオバイボタ、マンリョウ(常緑低木)、ジャノヒゲ、オオバジャノヒゲ、ヤブラン、キチジョウソウ</p> |
| 中 | <p>ヒノキ(常緑高木)、サワラ(常緑高木)、カラマツ(落葉高木)、イチイ(常緑高木)、イチヨウ(落葉高木)、マテバシイ(常緑高木)、ウバメガシ(常緑低木~小高木)、カシワ(落葉高木)、ヒイラギ(常緑低木~高木)、ミズキ(落葉高木)、センダン(落葉高木)、ユリノキ(落葉高木)、キリ(落葉高木)、アオギリ(落葉低木)、アラタナス(落葉高木)、ヒサカキ(常緑低木)、トベラ(常緑低木)、イヌツゲ(常緑低木)、クチナシ(常緑低木)、アジサイ(落葉低木)、ツツジ類、ハコネウツギ(落葉低木)</p> | <p>ヒヨクヒバ(常緑高木)、シノブヒバ(常緑低木)、キャラボク(常緑低木)、コナラ(落葉低木)、ビンオーク、クリ(落葉高木)、オニグルミ(落葉高木)、クマノミズキ(落葉高木)、アメリカハナミズキ、コブシ(落葉高木)、アカメガシワ(落葉高木)、イイギリ(落葉高木)、クサギ(落葉低木~小高木)、トキワサンザシ(常緑低木)、ヒイラギナンテン(常緑低木)、イボタ(落葉低木)、ヤマアジサイ(落葉低木)、マユミ(落葉低木)、ゴンズイ(落葉低木)、ヤマウコギ(落葉低木)、ニワトコ(落葉低木)、ヤブデマリ(落葉低木)、ガマズミ(落葉高木)、ヤブコウジ(常緑低木)、サルトリイバラ、アケビ、エビズル、ノブドウ、ヤブマオ、メヤブマオ、ノダケ、ウラシマソウ、イノコトチ、フタリシヅカ、ドクダミ、ナルコユリ、ホウチャクソウ、キマユリ、コバノギボウシ、ミヨウガ、タチシオデ、シオデ、シラヤマギク、カモガヤ、ベニシダ、イタチシダ</p> |
| 小 | <p>カヤ(常緑高木)、モミ(常緑高木)、ボブラ類、タチヤナギ(落葉低木)、シダレヤナギ(落葉高木)、アカラシ(常緑高木)、ケヤキ(落葉高木)、クスノキ(常緑高木)、サクラ類、ウメ(落葉高木)、カリン、エンジュ、ニセアカシア、フジキ、カエデ類、カキ、サルスベリ(落葉高木)、シナノキ(落葉高木)、バラ類、ハギ類、ニシキギ(落葉低木)、アセビ(常緑低木)</p> | <p>イヌガヤ(常緑低木)、メタセコイヤ(落葉高木)、イヌシデ(落葉高木)、アカシデ(落葉高木)、ムクノキ(落葉高木)、エノキ(落葉高木)、エゴノキ(落葉小高木)、カツラ(落葉高木)、カマツカ(落葉低木)、イヌエンジュ(落葉高木)、キハダ(落葉高木)、シンジュ(落葉高木)、ハゼノキ(落葉高木)、ヤマハゼ(落葉小高木)、ヤマグワ(落葉高木)、コウゾ(落葉低木)、ボケ(落葉低木)、ホザキナナカマド、ヤマブキ(落葉低木)、モミジイチゴ(落葉低木)、クサイチゴ(落葉半低木)、ユキヤナギ(落葉低木)、ムラサキシキブ(落葉低木)、ヒウガミズキ(落葉低木)、サンショウ(落葉低木)、ハナゾノツクバネウツギ(常緑低木)、コウヤボウキ、フジ(落葉低木)、ナツツタ、ツルウメモドキ、トコロ、ヤマノイモ、ヘクソカゾラ、アマチャヅル、カラスウリ、スイカズラ、ミズヒキ、ナキリスゲ、エビネ、ヌカキビ、チヂミザサ、トボシガラ、ハリカナワラビ、クマワラビ、ハシゴシダ、イヌワラビ、ヤラワシダ、ミゾシダ、シケシダ、ゼンマイ、カニクサ、タチツボスミレ、ヤマシロギク、テクリスゲ</p> |
| 危険 | <p>アカマツ(常緑高木)、クロマツ(常緑高木)、タイオウショウヒマラヤシダー、スギ(常緑高木)、タイサンボク(常緑高木)、キンモクセイ(常緑小高木)、シュロ(常緑高木)、マダケ、オカメザサ、クマザサ、アズマネザサ、ウィーピングラブグウス</p> | <p>トウジュロ(常緑低木)、タケ類、ササ類、ススキ、ノガリヤス、シバ</p> |

水幕と樹木の併用による延焼防止
向上効果に関する研究報告書

昭和60年3月

自治省消防庁消防研究所

東京都三鷹市中原3丁目14番1号
電話(0422)44-8331(代)