

ラック式倉庫の火災時燃焼性状

酒井規公子

Burning Behavior of Rack Storage Fire

Kikuko Sakai

Fire growth rate changes depending on the space geometry of the stored goods, height, the flue spacing, and the flammability. The present study is concentrated on the relationship between maximum burning rate and geometry of the stored goods in a rack. The model fuel used in the experiments are corrugated paper blocks of multi-layered, and which are set on the model rack with equally separated horizontally space. Experimental results indicated a linear relationship between maximum burning rate and the space packing density of fuel blocks with considering the convection and radiation between each fuel block. The storage arrangement is an important factor which determine the initial flame spread rate in the rack.

目次

第一章	序論	3
1.1	研究の背景	3
1.2	研究の目的	3
1.3	本研究に関わる既往の研究	3
1.4	本研究における用語の定義	4
1.5	研究の進め方及び論文の構成	4
第二章	ラック式倉庫の実態	5
2.1	国内におけるラック式倉庫の実態	5
2.2	過去に起こったラック式倉庫火災	9
2.3	まとめ	9
第三章	ラック式倉庫のスプリンクラー設備の設置基準	10
3.1	日本におけるスプリンクラー設備設置基準	10
3.2	日本、アメリカ、イギリスにおけるスプリンクラー設備設置基準の比較	12
3.3	まとめ	15
第四章	立体的に配置された可燃物の燃焼性状に関する模型実験	16
4.1	実験目的	16

4.2 実験概要	16
4.3 実験方法	17
4.4 実験条件	18
4.5 実験結果及び考察	20
4.6 まとめ	30
第五章 結論	31
謝辞	32
参考文献	33
付録	36

第一章 序論

1.1 研究の背景

日本におけるラック式倉庫は、1965年に初めて建設され、日本経済の高度成長による各種物流の増大とともに、合理化、省スペースおよび省力化による物流コストを低減させるために増加してきた。

ラック式倉庫の多くは、その収容効率を高めるため、天井を高くし、内部に人が通行することのできる通路を少なくしたものである。倉庫の高さが高くなればなるほど、単位床面積当たりの収容量が増加するため、火災荷重は増大し、火災の際に消火が困難となり、莫大な損害をもたらす危険性がある。

欧米では、この危険性に対して、損害保険分野で引き受けを制限するなどの対策で、高さが高いラック式倉庫が出現することを防いでいる。

しかし、日本では「火の用心」で代表されるように、火災の発生防止(予防)が中心であり、火気管理を強化し、「火を出さない」ことに力を注いでいる。このため、ラック式倉庫を建設する際も、火災が発生したときの消火対策を考慮して倉庫の規模を制限したり、2棟に分けるといったことはなく、法律で規制された最低限の防火設備を設置した巨大な倉庫を建築する傾向がある。

日本では、1995年まで、ラック式倉庫で大きな火災が発生していなかったため、上記のような問題はあまり重要視されなかった。しかし、1995年11月に埼玉県の大規模なラック式倉庫で火災が起こり、消防法に従って設置されていたスプリンクラーが作動したにも拘わらず、延焼抑制、消火ができず、結果的に3名が死亡する被害が発生し、ラック式倉庫の安全性が問題となった。

したがって、ラック式倉庫火災における人的被害と物的被害を軽減するため、ラック式倉庫の火災安全性について調査研究する必要がある。

1.2 研究の目的

ラック式倉庫における荷物の入出庫は、昇降機(スタッカークレーン等)によって自動搬送する形式を採っている。このため、昇降機の通路などの搬入・搬出のための空間が収容物の周囲に存在し、ラック内で出火すると、この空間に沿って炎や高温気体は上部の収容物を熱しながら上昇し、天井に達すると水平方向に広がり、他のラックにある収容物に次々と延焼する可能性がある。また、このようなラック式倉庫内部の火災は、ラック式倉庫の構造上の特殊性により、人の手で有効な消火を行うことは困難であり、そのうえ倉庫内部に入った人の命を脅かす危険性がある。

このような特徴を踏まえ、一定規模以上のラック式倉庫について、自動消火設備であるスプリンクラー設備の設置が消防法上義務付けられている。しかし、スプリンクラー設備によって、火災を制御、鎮火するためには、適当な時間に適当な場所のスプリンクラーが作動しなければならない。

そこで、本研究は、スプリンクラーが有効に作動するために必要な火災時のラック式倉庫内の温度分布、火災高さ、燃焼速度といった燃焼性状について明らかにすることを目的とする。

1.3 本研究に関わる既往の研究

1979年～1988年、FMRC(Factory Mutual Engineering and Research Corporation)によるラック式倉庫の実大模擬火災実験が行われ、ラック式倉庫を防護する消火設備として、スプリンクラー設備が適当であるとされた[1,2,3,4,5]。Thomas[1]は、この一連の実大実験により、可燃物の隙間の大きさと延焼速

度には何らかの関係があると推測しているが、それを実験では明らかにしていない。

Yu and Stavvrianiadis[6]は、2,3,4,5 列のラック式倉庫の実大火災実験を行い、ラック式倉庫内での初期火災時における対流発熱速度は、ラックの列数に関係なく、時間の 3 乗に依存するとしている。しかし、その後 Thomas[7]によって、ラック式倉庫内での初期火災時における対流発熱速度は、時間の 3 乗で表すよりも時間の指数関数によって表す方が実験値とよく一致するとされた。

Ingason [8,9]は、不燃材で作った二次元のラック式倉庫の縮尺模型を使って実験を行い、垂直方向の隙間の大きさがプルームの流れを支配する幾何学的なパラメータになるとし、水平方向の隙間の大きさは、ラック内のプルームの流れに影響しないとしている。その後、彼は、可燃物を使ったラック式倉庫の縮尺模型実験と実大模型実験を行い、垂直方向の隙間の大きさが、ラック式倉庫内の高さ方向の気流速度、温度分布に影響を与えるとした。

このように、実規模の火災実験が世界的に行われているが、日本では小規模数例しか行われていない。発表された論文・報告の中では、スプリンクラーの作動に必要なラック内の温度分布、火炎高さ、気流速度などが発熱速度を用いて表されている。しかし、ラック内での収容物の積み上げ方、収容物間の隙間の大きさといった幾何学的パラメータが、発熱速度にどのように影響を与えるかは、未だ研究されていない。

1.4 本研究における用語の定義

[ラック式倉庫 (Rack Storage)] ラック式倉庫とは、棚(ラック)またはこれに類するものを設け、昇降機(スタッカークレーン等)により収納物の搬送を行う装置を備えた倉庫を言う。このため、収容物を立体的に収納し、合理的な入出庫管理を行うことができる。

[スタッカークレーン (Stacker crane)] 荷物を棚に積み、また棚から出庫台へ搬送するクレーンの総称。

[ラック(Racking)] 荷物を立体的に格納する建築物。

[パレット(Pallet)] 品物をすのこ状の台に積みつけ、500kg とか 1t 程度のユニットロード(包装単位)とし、荷役、運搬、貯蔵する形態が一般的であるが、この台をパレットと呼ぶ。

[列(Row)] スタッカークレーンの走行方向に垂直な方向への棚の数え方の単位。

[段(Level)] ラック高さ方向への棚の数え方の単位

[棚数(Storage capacity)] (列の数)×(連の数)×(段の数)

1.5 研究の進め方及び論文の構成

ラック式倉庫の研究を行うにあたって、日本国内におけるラック式倉庫の実態を把握する必要がある。そのため第二章では、ラック式倉庫の件数、高さ、収容物の種類、使用されるパレットの材質、スプリンクラー設備等と過去に起こったラック式倉庫火災について述べる。

第三章では、日本、アメリカ、イギリスのラック式倉庫におけるスプリンクラー設備基準について調査し、比較検討を行う。

第四章では、ラック式倉庫を想定し、可燃物を収容物に見立てた縮尺模型を作成し、可燃物の数や、その積み上げ高さ、収容物間の隙間の大きさといった積み上げ方法を変化させて燃焼実験を行う。この実験で得られた結果により、ラック内での収容物の積み上げ方法といった幾何学的パラメータが、発熱速度、ラック内の温度分布、火炎高さに与える影響について考察していく。

第二章 ラック式倉庫の実態

2.1 国内におけるラック式倉庫の実態

2.1.1 市場の動向

ラック式倉庫が日本で始めて導入されたのは 1965 年である。その後、労働力の不足、3K 嫌いからの自動化・省人化要求、地価高騰によるスペース有効利用、消費者の価値感の多様化による物流システムへの多品種少量・小口化対応のニーズから、市場は順調に伸びてきた。92 年度に 1300 億円まで成長した市場は、バブル経済の崩壊による設備投資の低迷を受け 94 年度に 55%まで減少したが、95 年度には景気の回復に伴い、830 億円まで増加した(図 2.1 参照)。ラック式倉庫の納入件数は、1991 年をピークに減少したが、物流合理化に対する潜在ニーズは大きく、経済回復とともにラック式倉庫も回復すると予測される(図 2.2 参照)。当初は単なる立体保管を主体に導入されたラック式倉庫も、多種多様な保管設備、搬送設備、仕分設備あるいは高度な情報処理システムと結びついて高度に発達した物流システムへと発展した。

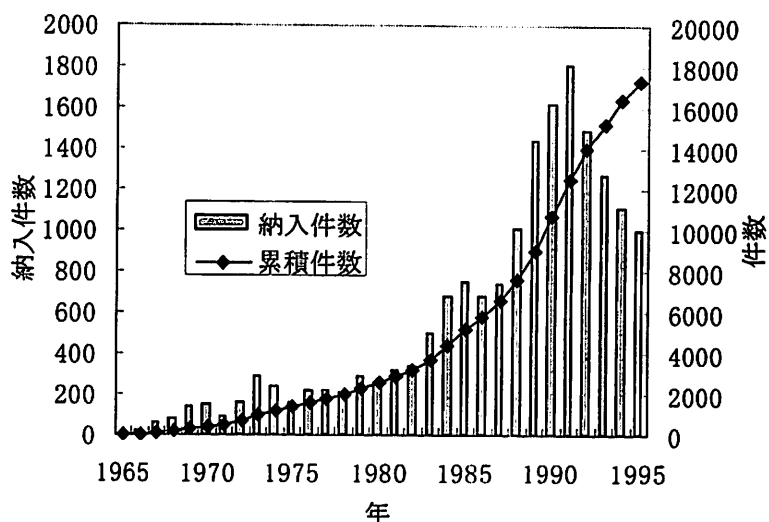


図2.1 ラック式倉庫の件数

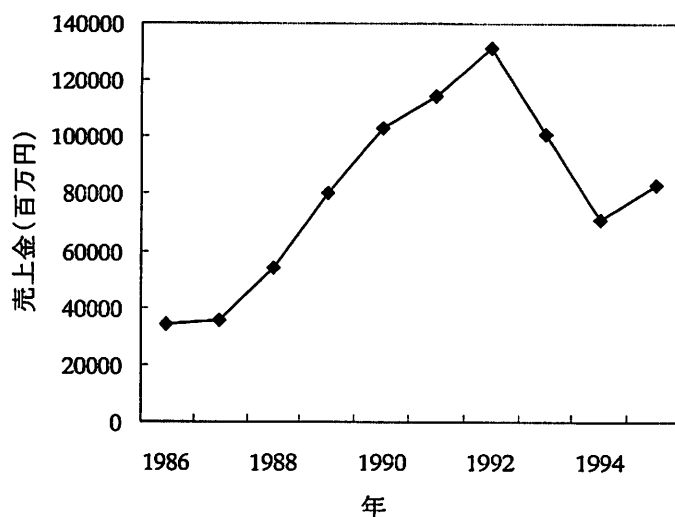


図2.2 ラック式倉庫納入売り上げ金額の推移

近年におけるラック式倉庫は、劣悪な作業環境から作業者を解放するため、冷凍、冷蔵、危険物、暗室内、クリーンルーム等に設置されるケースが増加している。なかでも危険物用ラック式倉庫は、平成2年に施行された消防法の改正により、危険物第2類と第4類の屋内貯蔵所として、床面積 1000 m²以下、軒高 20m 未満の範囲で建築が可能となり、石油精製、塗料、印刷、油脂、化学、表面処理加工等の業界を中心に導入が広がっている。¹⁰⁾

2.1.2 ラック式倉庫の分類と特徴

ラック式倉庫には構造の違いによって、ビル型とユニット型に分けられ、さらにユニット型は、搬送・保管の単位によって、ユニットロードのパレットタイプとミニロードのバケットタイプ及びケースタイプのものに分けることができる。(図 2.3 参照)

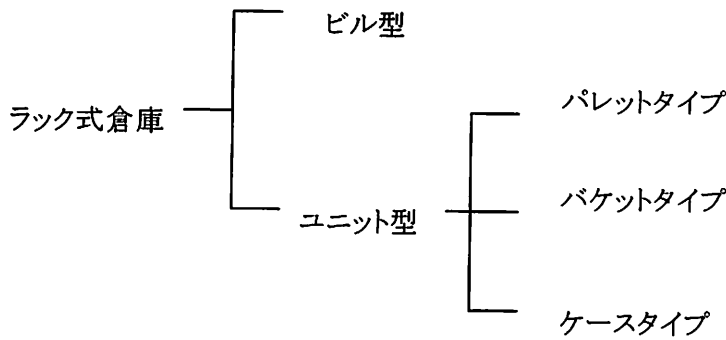


図 2.3 ラック式倉庫の分類

ビル型は、ラックの構造体に直接外壁材と屋根を取り付けたもので、建屋を別途に建てる場合と比較して、経済的で工期も短くて済む。大規模なラック式倉庫(スプリンクラー設備の設置義務の生ずる延べ面積 700m²以上、天井高さが 10m 以上のもの)は、主としてビル型ラックになっている。(図 2.4 参照)

一方、ユニット型は、新設・既設を問わず建屋内に手軽に設置できる(図 2.5 参照)。簡便さと経済性に的を絞り徹底した標準化・ユニット化によって低価格と短納期を実現させた。

搬送・保管がパレット、パレットコンテナ、ロールボックスパレットなどの場合は、パレットタイプを使用し、1 品種当たりの保管量が少なく、保管する品物が小さく、パレット単位では需要単位として大きすぎる場合、バケットやケースなどの小型容器に入れて保管する、バケットタイプやケースタイプが適する。バケットタイプは、工場、流通、サービスの広い分野で使われ、ケースタイプは検索機能を重視するオフィス、病院、金融などの書類、フロッピーディスク、カルテ、有価証券などの保管に使われている。

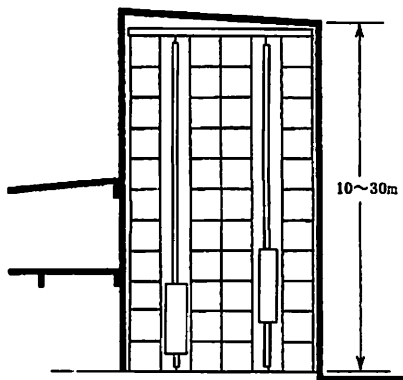


図 2.4 ビル型ラック¹⁰⁾

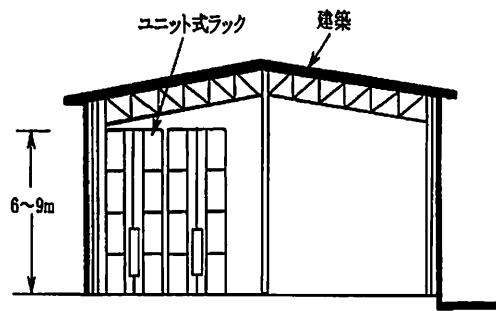


図 2.5 ユニット型ラック¹⁰⁾

2.1.3 ラック式倉庫の実態

ラック式倉庫の数は、近年著しく増大し、それに連れて倉庫も高層になってきた。以下、国内におけるラック式倉庫の実態についてまとめた。

2.1.3.1 ラック式倉庫の最高の高さ

1973 年では、15~20m の高さのものが全体の約 31%で最も多かった¹¹⁾(図 2.6 参照)。それに対して、

1995 年では、25～30m の高さのものが全体の 33%を超えており、将来的には高さ 31m を超える高層ラック式倉庫の普及が予想される。(図 2.7 参照)

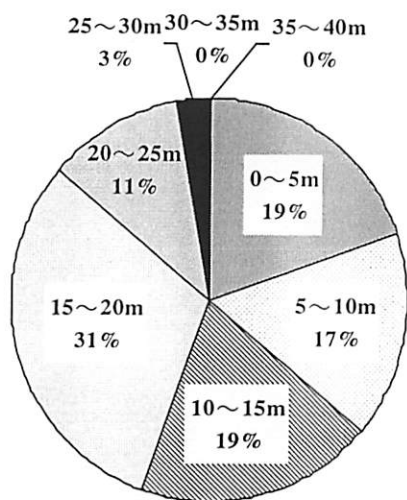


図2.6 ラック式倉庫の高さ 1973年

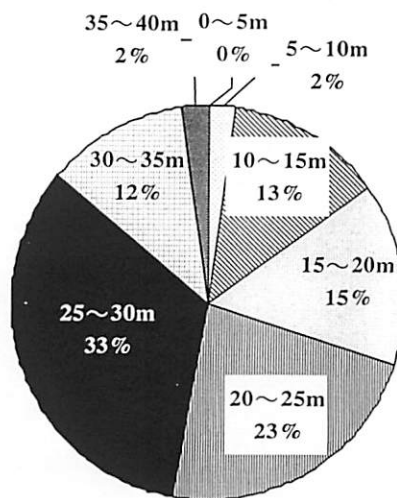


図2.7 ラック式倉庫の高さ 1995年

1995 年の実績をもとに、ラック式倉庫一件当たりの平均規模を算出すると表 2.1 の通りである。ビル型は大規模、一方ユニット型は小規模で、ビル型に比べ約 1/6 のパレット数である。

表 2.1 ラック式倉庫の平均規模¹⁰⁾

	1995 年	
	ユニット型	ビル型
パレット数	619	3709
クレーン台数	2.1	3.9

2.1.3.2 収容物の種類

ラック式倉庫に保管される収容物の種類は、図 2.8 に示すとおりである。図 2.8 より、不燃物が 36%と最も多い。しかし、その他の収容物は、紙類や木製類といった可燃物や、燃えた際に高い発熱量を出す合成樹脂類である。¹²⁾

2.1.3.3 パレットの材質

パレットの材質は、木製が 70%近くを占めている。しかし、食品・薬品関係などでは、衛生上の観点から合成樹脂製を使用しており、今後合成樹脂製のパレットが増える傾向にある。¹²⁾ (図 2.9 参照)

2.1.3.4 梱包材の種類

収容物の梱包材のうち、可燃性が高いと考察される紙製、木製及び合成樹脂製が約 88%と大部分を占めている。このため、収容物、パレットとともに燃焼の危険性を考慮する必要がある。(図 2.10 参照)¹²⁾

2.1.3.5 棚等部分に設置されたスプリンクラーヘッドの表示温度

ラック式倉庫の棚等部分に設置されたスプリンクラーヘッドは、閉鎖型(表示温度 72℃)が約 86%を占めている。¹²⁾ (図 2.11 参照)

2.1.3.6 一つのスプリンクラーヘッドが防護するラックの段数

一つのスプリンクラーヘッドが防護するラックの段数は、1～3 段で約 69%を占めており、有効散水対策を考慮する必要がある。¹²⁾ (図 2.12 参照)

2.1.3.7 天井部分に設置されたスプリンクラーヘッド

ラック式倉庫の天井部分に閉鎖型(表示温度 72℃)スプリンクラーヘッドが全体の約 77%設置されている。¹²⁾ (図 2.13 参照)。また、わずかであるが、ラック部分に設置しているスプリンクラーヘッドよりも、天井部分に設置されたスプリンクラーヘッドの作動温度を高くしている倉庫がある。

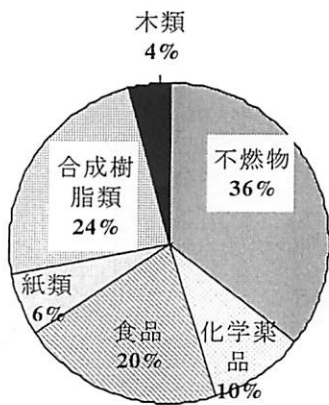


図2.8 収容物の種類

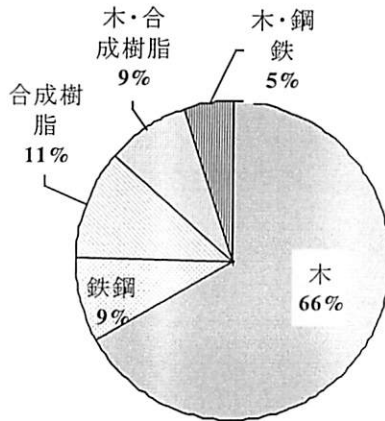


図2.9 パレットの材質

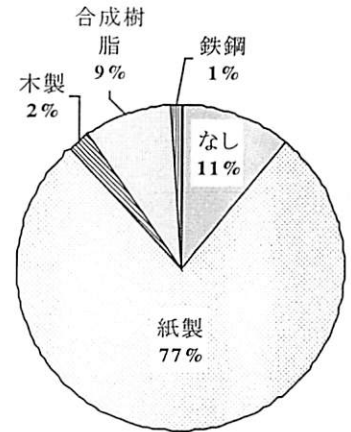


図2.10 梱包材の種類

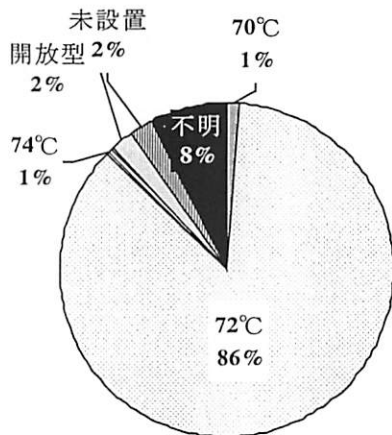


図 2.11 ラック部分に設置されたスプリンクラーヘッドの表示温度

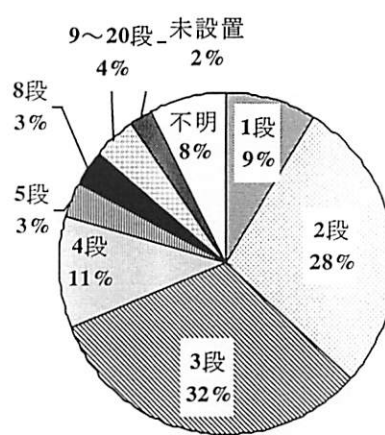


図 2.12 一つのスプリンクラーヘッドが防護するラック段数

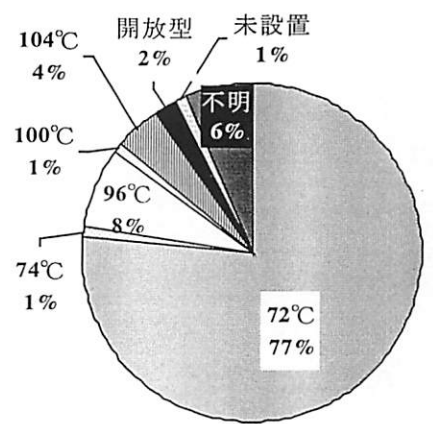


図 2.13 天井部分に設置されたスプリンクラーヘッドの表示温度

2.2 過去に起こったラック式倉庫火災

日本における倉庫火災は、消防白書によると年間約 3,000 件発生している。しかし、消防白書では、一般倉庫の火災とラック式倉庫火災を区別することはなく、倉庫火災として取り扱っているため、過去にラック式倉庫火災が何件起こったかわからない。ここでは、1995 年 11 月に起こったラック式倉庫火災の事例を紹介する。¹³⁾

[事例]

1995 年 11 月 8 日午後 11 時 30 分頃、埼玉県吉見町下細谷の東洋製罐埼玉工場の倉庫から出火、約 23 時間も燃え続け、鉄骨造一部 2 階の同倉庫約 3,000 m²をほぼ全焼し、死者 3 名、重軽傷者 6 名をだす惨事となった。インフラパック機でポリエチレンシートを赤熱ヒーターで熱収縮させて梱包する際、ポリエチレンシートとヒーターが接触し、ポリエチレンシートに着火したのが出火原因である。

*出火日時 1995 年 11 月 8 日 23:30 ごろ

*出火場所 東洋製罐埼玉工場の自動倉庫西側 No.8 レーン中央部、高さ 20m 付近から出火

*出火原因 梱包材であるポリエチレンシートがインフラパック機において着火した。

*消防通報 出火から 22 分後の 23:52 分ごろ

*死傷者 死者 3 名 重軽傷者 6 名

*被害総額 17 億円

*倉庫概要 床面積 3,051.49 m²、高さ 32m の自動高層ラック式倉庫。倉庫部分の構造はラック構造体に外壁や屋根を持たせた鉄骨軽量気泡コンクリート張り。収容能力:7,464 棚。当日の収容物は飲料用缶 6,415 棚。スタッカークレーン:8 基。ラック:12 段×16 列。

*消火設備 スプリンクラー設備(ポンプ:1,800l/min×71m)、スプリンクラーヘッド数:1,420 個。天井スプリンクラー:380 個(横 2.1m 間隔に設置。表示温度 96℃)。ラック内スプリンクラー:1,040 個(ラック内は高さ 5.2m 間隔で 3 段毎、横 3.5m 間隔に設置。表示温度 72℃)。屋内消火栓(ポンプ:2,000l/min×65m×37kW×200m³)。自動火災報知設備設置。

2.3 まとめ

ラック式倉庫の数は近年著しく増大し、それに連れて倉庫も高層化し、高さ 25~30m の高層倉庫も出現しており、将来的には高さ 31m を超える高層ラック式倉庫の普及が予想される。また、近年におけるラック式倉庫は、劣悪な作業環境から作業者を解放するため、冷凍、冷蔵、危険物、暗室内、クリーンルーム等に設置されるケースが増加している。なかでも危険物用ラック式倉庫は、平成2年に施行された消防法の改正により、危険物第 2 類と第 4 類の屋内貯蔵所として、床面積 1000 m²以下、軒高 20m 未満の範囲で建築が可能となり、石油精製、塗料、印刷、油脂、化学、表面処理加工等の業界を中心に導入が広がっており、収容物の種類も多彩になる。こういったラック式倉庫が万一火災になった場合、倉庫だけでなく周辺の住宅にも影響を及ぼすような大規模な火災になる可能性がある。

また、収容物が不燃物であっても、梱包材やパレットが、紙、合成樹脂、木製といった可燃物である場合があり、危険性を考慮する必要がある。

第三章 ラック式倉庫のスプリンクラー設備の設置基準

3.1 日本におけるスプリンクラー設備設置基準

ラック式倉庫のスプリンクラー設備の設置に係る技術基準の関係条文については、次のとおりである。

3.1.1 消防法施行令

3.1.1.1 スプリンクラー設備設置基準¹⁴⁾

第 12 条前項第四号

別表第一(14)項に掲げる防火対象物のうち、天井(天井のない場合にあつては、屋根の下面。次項において同じ。)の高さが 10m を超え、かつ、延べ面積が 700m² 以上のラック式倉庫(棚又はこれに類するものを設け、昇降機により収納物の搬送を行う装置を備えた倉庫をいう。)

すなわち、消防施行令第 12 条第 1 項四号の規定は

- ① ラック式倉庫であること
- ② 天井高さが 10m を超えること
- ③ 延べ面積が 700m² 以上のものであること

が要件である。したがって、ラック式倉庫とその他の倉庫が同一棟である場合、ラック式倉庫部分が 700m² より小さくても、倉庫全体で 700m² 以上ならば、同号の対象となる。

3.1.1.2 スプリンクラー設備技術基準

スプリンクラー設備の設置及び維持に関する技術上の基準は、次のとおりである。¹⁴⁾

第 12 条 2 項

第四号 水源は、その水量がスプリンクラーヘッドの種別に応じ自治省令で定めるところにより算出した個数に、1.6m³ を乗じて得た量以上の量となるように設けること。

第五号 スプリンクラー設備は、スプリンクラーヘッドの種別に応じ自治省令で定めるところにより算出した個数のスプリンクラーヘッドを同時に使用した場合に、それぞれの先端において、放水圧力が 1kgf/cm² 以上でかつ、放水量が 80l/min 以上の性能のものとする。

第六号 水源は、その水量がスプリンクラーヘッドの種別に応じ自治省令で定めるところにより算出した量以上の量となるように設けること。

第七号 スプリンクラー設備には、非常電源を附置し、かつ、消防ポンプ自動車容易に接近することができる位置に双口形の送水口を附置すること。

第 12 条 3 項

第 1 項各号に掲げる防火対象物又はその部分に水噴霧消火設備、泡消火設備、二酸化炭素消火設備、ハロゲン化物消火設備又は粉末消火設備を次条、第 14 条、第 15 条、第 16 条、第 17 条若しくは第 18 条に定める技術上の基準に従い、又は当該技術上の基準の例により設置したときは、同項の規定にかかわらず、当該設備の有効範囲内の部分についてスプリンクラー設備を設置しないことができる。

3.1.2 消防法施行規則

消防法施行令第 12 条第 1 項第四号のラック式倉庫に設置するスプリンクラー設備の設置および維持に関する技術上の基準の細目は、次の通りである。¹⁴⁾

3.1.2.1 ラック式倉庫等に設けるスプリンクラーヘッド等

消防法施行例令第 12 条第 2 項第二号ハの自治省令で定める種別のスプリンクラーヘッドのうち同条第 1 項第四号に掲げる防火対象物に設けるものは、閉鎖型スプリンクラーヘッドのうち標準型ヘッド(有効散水半径が 2.3mのものに限る。)とする。

第 12 条3項

一 スプリンクラーヘッドは、棚又はこれに類するものを設けた部分にあつては、その各部分から一のスプリンクラーヘッドまでの水平距離が 2.5 m 以下となるように、かつ、次の表の左欄に掲げる物品の区分に応じそれぞれ同表の右欄に定める高さにつき 1 個以上火災を有効に消火できるように設けること。

表

物品区分	高さ
指定可燃物	4メートル
その他のもの	6メートル

二 スプリンクラーヘッドは、前号に掲げる部分以外の部分にあつては、天井又は小屋裏の各部分から一のスプリンクラーヘッドまでの水平距離が 2.1 m 以下となるように設けること。ただし、次のイからハまでに掲げる部分は、スプリンクラーヘッドを設けないことができる。

イ 階段、浴室、便所その他これらに類する場所

ロ 通信機器室、電子計算機器室その他これらに類する室

ハ 発電機、変圧器その他これらに類する電気設備が設置されている場所

三 第一号に規定する部分に設けるスプリンクラーヘッドには、火災の際すみやかに当該ヘッドを作動させることができる集熱板を設けること。

3.1.2.2 スプリンクラー設備の水源の水量等

消防法施行令第 12 条第 2 項第四号のスプリンクラーヘッドの個数の算出方法は次の通りである。

第 14 条 5 項

一 閉鎖型スプリンクラーヘッドを用いる場合は、次の表の左欄に掲げる防火対象物の区分に応じ、スプリンクラーヘッドの設置個数が同表の右欄に定める個数(乾式又は予作動式の流水検知装置が設けられているスプリンクラー設備にあつては、当該右欄に掲げる個数に 10 加えた個数。以下この号において同じ。)以上であるときにあつては当該同表の右欄に定める個数、スプリンクラーヘッドの設置個数が同表の右欄に定める個数に満たないときにあつては当該設置個数とすること。

表

防火象物の区分	個数
指定可燃物を貯蔵し又は取り扱うもの	30
その他のもの	20

以上のことをまとめると、次の図のようにスプリンクラーヘッドを配置する。

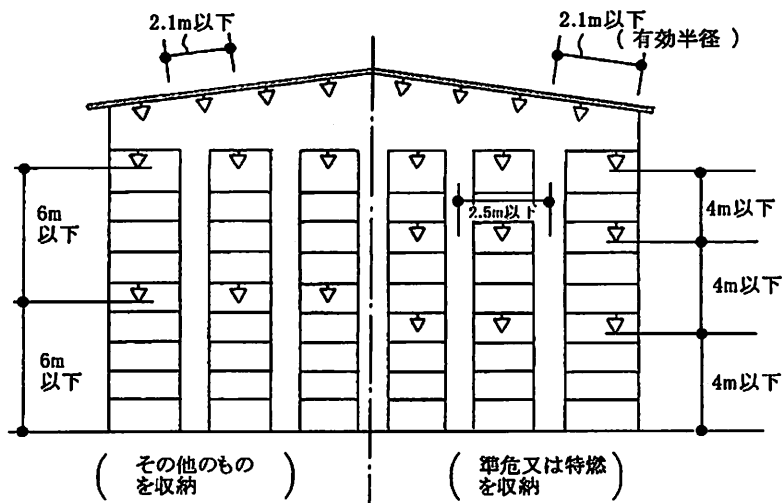


図 3.1 ラック式倉庫のスプリンクラーヘッドの取り付け

3.2 日本、アメリカ、イギリスにおけるスプリンクラー設備設置基準の比較

ラック式倉庫におけるスプリンクラー設備の設置基準は、日本では消防法施行令、消防法施行規則、アメリカでは NFPA(全米防火協会)によって制定された基準 NFC-231C(National Fire Codes)¹⁵⁾、イギリスでは BS(英国規格)基準¹⁶⁾によって規定されている。各国の基準を表 3.1 に示す。また、次に各基準の特徴について述べる。

3.2.1 プラスチックパレット

一般にプラスチックパレットは発熱量が大きく、高温になると可燃性液体に似た燃焼性状を示す可能性があり、木材等のように水の浸透もないので、水による消火は困難である。したがって、NFC-231C ではプラスチックパレットの使用を除外している。

3.2.2 収容物の分類

消防法では「指定可燃物」「その他」の 2 種類の区分であるのに対し、NFC では、I～IVの 4 種類のクラスに加え、プラスチックで A,B,C の 3 種類のグループという計 7 区分になっている。これは各製品の燃焼性状の違いから制定されたもので、全て実験データに基づいて、それぞれのケースに必要なスプリンクラーヘッドの配置、散水密度といった諸条件が事細かに定められている。対象物の分類中プラスチックは危険性の高いものとして、燃焼性などにより A,B,C の 3 つに区分され、A は一番消火困難で、A が露出して貯蔵されている場合は NFC-231C では扱えない。BS 基準でも収容物をグループ I～IVの 4 種類に分けている。NFC、BS 基準では、収容物の種類だけでなく、収容物を包装している物の材質や梱包方法についても細かく分類されている。

3.2.3 多数の天井面スプリンクラーヘッドの作動

ラック倉庫は天井面が高く、収容物の左右前後に吹き抜けの空間があるので、火炎が上昇し易い為、ラック内のスプリンクラーヘッドより天井面スプリンクラーヘッドの方が作動しやすく、多数の天井面スプリンクラーヘッドが作動する可能性がある。したがって、NFC-231C では天井面のスプリンクラーヘッドはラック内のスプリンクラーヘッドより作動温度の高いスプリンクラーヘッドを奨励している。

3.2.4 上方延焼防止

ラック式倉庫は収容物の前後左右に適度な空間があり、燃焼速度が速いので、上方及び水平面の燃焼も速い。NFC-231C では水平面の延焼を防止するため、各収容物間の左右の吹き抜け空間の保持を規定している(上部へ火炎を誘導することにより、水平方向への延焼を防止する目的)。ラック間距離も定められており、その距離によって要求されるスプリンクラーヘッドの数、散水密度、給水量が決められている。

3.2.5 給水源の大きさ

消防法施行令は公設消防署が消火活動を開始するまで、火災拡大を小さく抑え、公設消防により火災損害を最小限にする目的で基準が設けられている。その結果、スプリンクラー設備を含む水系消火設備では給水源は 20 分間程度以上の給水を想定している。一方、NFC-231C、BI 基準では自力消火を目的とした自衛のための基準で、対象物によって差はあるが、通常のラック倉庫は 90 分間程度以上給水できる容量を想定している。

3.2.6 スプリンクラーヘッドの配置

NFC-231C では、ラック式倉庫にスプリンクラー設備に設置する際には、スプリンクラーヘッドを水平方向・垂直方向ともに交互に配列するように定めている(千鳥配列)。この配列を行うと、倉庫内の任意の位置から 1 番近いスプリンクラーヘッドまでの距離が短くなるので、火元の熱を感知してスプリンクラーヘッドが作動するまでの時間を短縮することができる。また、複数のスプリンクラーヘッドが作動した場合の散水も均一になり、消火効率が高まる。千鳥配列を行うと、設計や施工が複雑になるが、スプリンクラー設備による初期消火が重要であるラック式倉庫の場合には、千鳥配列で設置することが望ましいと考えられる。消防法令は建物用途が決まれば、スプリンクラー設備の最低条件(スプリンクラーヘッドの配

置、消火ポンプの排出量、貯水量)が一つに定められているが、NFC-231C では散水密度とスプリンクラーヘッド作動面積のグラフよりスプリンクラーヘッドの配置(散水密度に関係する)、消火ポンプの吐出量、貯蔵量等がある範囲で選択できる幅がある。これは、日本の消防法施行令では、基準の適用の複雑さをさけるのが目的で、基準値を一つとしているが、NFC-231C では、設計の柔軟性に重点を置いているための相違であると考えられている。

表 3.1 日本、アメリカ、イギリスのラック式倉庫におけるスプリンクラー設置基準

項目	日本 消防法令	アメリカ NFP 基準(NFC-231C)	イギリス BS 基準	
設置基準適用の基本となる貯蔵形態	一般貯蔵 ラック貯蔵	一般貯蔵 高積み貯蔵 ラック貯蔵	一般貯蔵 高積み貯蔵 ラック貯蔵	
ラック貯蔵	定義	天井高さが 10m を超え、かつ延べ面積 700m ² 以上で、昇降機による搬送装置を備えたラック式倉庫	原則として高さ 3.7m を超過してラック内に貯蔵するもの。ただしプラスチック製パレット及び棚板の使用を除く	ラック貯蔵すべて(高さについての制限はなく、すべて含まれる。)
	ラックの種類	—	単列ラック 双列ラック 多列ラック 移動式ラック 可搬式ラック	単列ラック 双列ラック 多列ラック
	通路(ラック間)の幅	—	1.2m 未満 1.2~2.4m 2.4m 超過	1.2m 未満 1.2~2.4m 2.4m 超過
	設置基準適用上の貯蔵物の級別分類	指定可燃物 その他のもの	級別 I : 木製パレット上の段ボール入り不燃性製品等 級別 II : 可燃性梱包材入りの級別 I の製品 級別 III : 木製パレット上の繊維、紙等 級別 IV : プラスチック包装の級別 I II III のもの等 プラスチック: ABC に分類	グループ I : カーペット、衣類、電気機器、ファイバーボード、ガラス製品 グループ II : 包装したコルク、ボール紙、リリウム製品、ロール巻きパルプ グループ III : ニトロセルロース、ロール巻きアスファルト紙、ゴム製品、木毛 グループ IV : 発泡プラスチックまたはホームラバーの切れ端、発泡プラスチックまたはホームプラスチックのロール巻き
ラック内ヘッドの配置	垂直距離: 指定可燃物: 4.0m 以下 その他: 6.0m 以下 水平間隔: 半径 2.5m 以下 荷物最上部とデフレクターの間隔: 45cm 以上	ラックの種類、貯蔵高さ、貯蔵物等によって異なるが、一般的に 垂直距離: 2.3m~3.5m 以下 水平距離: 1.4m~2.8m 以下 配置形態: 千鳥形 荷物最上部とデフレクターの間隔: 15cm 以上	ラックの種類、貯蔵高さ、貯蔵物等によって異なるが、一般的に 垂直距離: 2.3m~3.5m 以下 水平距離: 1.4m~2.8m 以下 荷物最上部とデフレクターの間隔: 15cm 以上	
フェイスヘッド	—	必要	—	
天井面ヘッドの散水密度	—	9.5~21.2l/min・m ²	7.5~30.0l/min・m ²	
天井面ヘッドの種類	標準型ヘッド	大口径、大粒滴、ESFR ヘッド	標準型ヘッド	
スプリンクラー装置の制御区分	—	天井面ヘッドとラック内ヘッドとは別個とする。	天井面ヘッドとラック内ヘッドとは別個とする。	
給水継続時間	20 分間以上	90(ESFR は 60 分、大粒滴)分間以上	90 分間以上	
補助消火(散水)設備	不要	必要	不要	

給水源の必要数	1 系統	原則 2 系統(1 系統でも良い場合がある)	原則 2 系統(1 系統でも良い場合がある)
給水源の所要水量	同時作動ヘッド数: 指定可燃物:30 個 その他: 20 個	最悪条件の 186m ² の面積内の作動ヘッド+ラック内ヘッド(6~14 個)が基本	最悪条件の 260m ² の面積内の作動ヘッド+ラック内ヘッド(3×段×列)が基本
高発泡泡との組み合わせ	—	ラック内ヘッドを省略できる。	—

3.3 まとめ

日本、アメリカ、イギリスのラック式倉庫におけるスプリンクラー設備の基準について調査し、比較検討を行った。

消防法施行例は、公設消防署が消火活動を開始するまで、火災拡大を小さく抑えることを目的として基準が設けられているが、NFC-231C、BI 基準では、自力消火を目的とした自営のための基準であり、基準の目的に相違がある。ラック式倉庫の特徴上、消防士等の人手による有効な消火を行うことは困難であると考えられることから、自力消火を目的とした基準が適している。

このように消防法施行令、アメリカの NFP 基準、イギリスの BI 基準といったラック倉庫のスプリンクラー設備の基準はいろいろなものがある。しかし、それ以上に、ラック式倉庫における収容物、収容方法、収容高さが千差万別であり、火災性状を決定する各種ファクターが多数存在する。このため、ここで完璧な設備内容を示唆することはできないが、火災性状(危険度)を想定し、危険度に見合ったスプリンクラー設備を総合的に勘案する必要がある。

第四章 立体的に配置された可燃物の燃焼性状に関する模型実験

4.1 実験目的

大規模なラック式倉庫火災が生じ、消火の困難性が指摘された。一般のラック式倉庫は、収容効率を高めるため、収容物を立体的に高密度に堆積している。この収納方法が、大きな消火困難の要因となっている。ラック式倉庫にみられるように、可燃物が立体的に堆積された時、熱の流れと可燃物の配置が一致するために、上方に位置する可燃物は予備加熱を受けてしまう事から、早い燃焼域拡大が生じる事が懸念される。

そこで、本研究は、可燃物が立体的に離隔距離を持って配置された場合の燃焼性状について知見を得る事を目的とする。

4.2 実験概要

2m×1.5m×2m～3m(高さ)のラックをアングルで組み、5cm メッシュの金網で棚を作った。棚と棚の間隔は自由に変化させられるようにした。このラックの上に試料を載せ、その堆積した試料の底部中央に着火し、フード下で燃焼させた。燃焼時の重量減少量を10秒毎に電子天秤で測定した。

ラック内の温度分布を K 型熱電対で測定した。熱電対で測定したデータは、データロガー (DE-1200: NEC 三栄)、GP-IB コンバータを介して、コンピュータ (PC-9821) に出力した。燃焼域の広がり方及び火炎高さは 35mm スチルカメラ、VTR で記録した。装置構成図を図 4.1 に示す。なお、測定項目の詳細は次項で述べる。

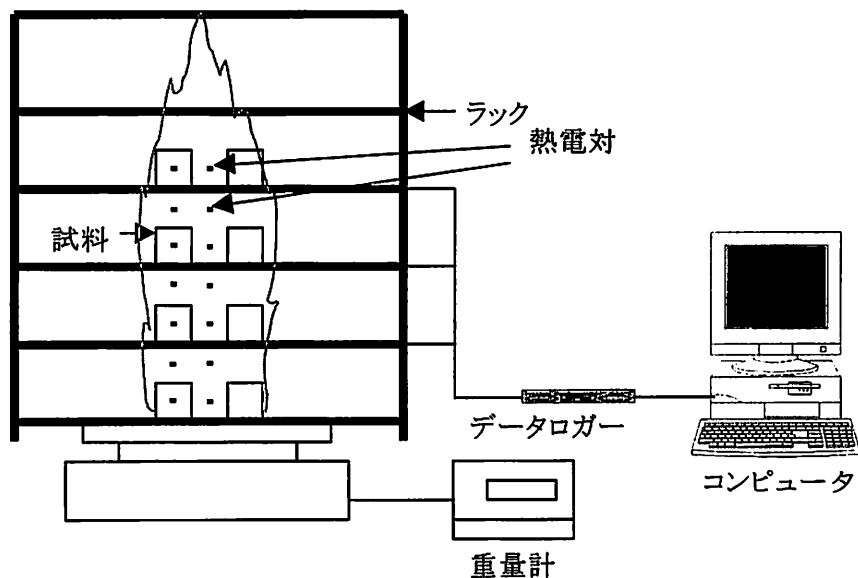


図 4.1 実験装置構成図

4.2.1 試料

本実験では、可燃物試料としてダンボール、不燃材として石膏系耐火ボードを使用した。

① 10 cm 四方の段ボールブロック

厚さ約 7mm の段ボール板を約 14 枚重ね、デンプン系の糊(段ボール紙の主成分であるセルロースの燃焼と同様な成分であるデンプン糊とし、発熱量を段ボール紙に合わせた)で接着し高さ 10cm とし、縦、横

10cm に切ったサイコロ状のものを試料とした。1 個あたりの重さは約 110g である。

② 10 cm 四方の不燃材ブロック

厚さ 25 mm、10 cm 角の石膏系耐火ボード(SC ボード：新日鐵化学)を 4 枚重ね合わせ、10 cm 四方のブロック状にし、これをアルミホイルで被覆した。1 個あたりの重さは約 950g である。

表 4.1 石膏系耐火ボードの物性値

	密度 (kg/m ³)	熱伝導率 (kcal/mh℃)	比熱 (kcal/m ³ ℃)
石膏系耐火ボード	950	0.183	204

③ 30cm 四方の段ボールブロック

厚さ約7mm、30 cm 角の段ボール板を約 40 枚重ね、デンプン系の糊で接着し、30 cm 四方の立方体にしたものを用いた。1個あたりの重さは約 2.7 kg である。

4.3 実験方法

実験においては、試料の含水率、燃焼に伴う試料の重量変化、火炎高さ、ラック内の温度分布を測定した。以下に、各測定内容を説明する。

4.3.1 含水率の測定

燃焼実験においては試料に含まれる水分が燃焼性に影響を与える。このため試料の含水率の測定を行う必要がある。段ボールブロックの重量を測定し、それを恒温槽で乾燥させた(60℃, 24h)。その後、恒温槽から取り出し、乾燥後の段ボール重量を測定し、(4.1)式から含水率(湿り材基準)を求めた。

$$G = \frac{W_w - W_D}{W_w} \times 100 \quad (4.1)$$

但し、

G: 含水率[%]

W_w : 乾燥前の試料重量[g]

W_D : 乾燥後の試料重量[g]

である。

4.3.2 燃焼に伴う試料の重量変化

ラックの上に試料を載せ、その堆積した試料の底部中央に着火し、フード下で燃焼させた。燃焼時の重量減少量を 10 秒毎に電子天秤で測定した。

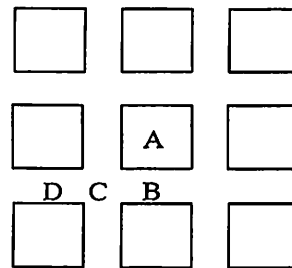
4.3.3 火炎の観察および火炎高さ

火炎の観察は、目視観察と合わせて VTR による映像および 35mm スチルカメラによる写真によって行った。また、火炎の高さは、VTR による記録画像から実験開始後 10 秒毎に、堆積試料の最上端から火炎の先端までの高さ L_f を測定した。

4.3.4 ラック内の温度

ラック内の火炎性状、延焼性状を知るためには、ラック内の温度を測定する必要がある。ラック内の水平方向の温度分布は図 4.2 に示す A~D の位置で測定した。AB、BC、CD 間の距離は、試料間の水平距

離 S_v によって変化させた。垂直方向の温度分布は、A の位置で 8 点 (熱電対 1-8CH)、B の位置で 9 点 (熱電対 9-17CH)、C 及び D の位置で 6 点 (熱電対 18-24CH, 25-30CH) 測定した。各実験条件における熱電対の高さを、付録表 A1.1~A1.7 に示す。

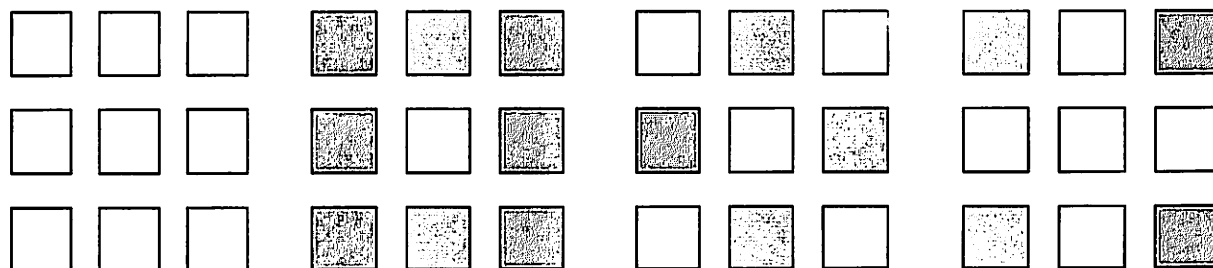


4.4 実験条件

試料の配置方法として、堆積物の底部面積、積み上げ高さ及び堆積物全体が占める空間体積内での試料が占める充填体積をパラメータとして、試料の個数と試料間の水平距離 S_v 、垂直距離 S_H を変化させた。その配置方法を表 4.2~4.5 に示す。ここで D は試料の代表長さである。実験は、下記の(a)~(e)の 5 種類行った。

図 4.2 熱電対の配置 (平面図)

- (a) 試料間の距離が、燃焼速度に与える影響を見るため、堆積物の①底部面積、②積み上げ高さ、③堆積物全体が占める空間体積内での試料が占める割合 (充填率) の 3 つをパラメータとして、段ボールブロック (10cm 四方) の個数と試料間の水平距離 S_v 、垂直距離 S_H を変化させた。その配置方法を表 4.2 に示す。
- (b) 燃焼に必要な酸素の供給に、試料間の隙間が与える影響を見るため、試料を 3×3 個の 3 段積み、中央の 3 段だけ段ボールブロックを使い、その他を同じ大きさの不燃材を用いて実験を行った。(図 4.3(b)参照)。また、そのときの試料の配置方法を表 4.3 に示す。
- (c) 燃焼域の広がり方を観察するため、試料と試料と同じ大きさの不燃材を図 4.3 (c) のように配置し実験を行った。そのときの試料の配置方法を表 4.4 に示す。
- (d) 燃焼域の広がり方を観察するため、試料と試料と同じ大きさの不燃材を図 4.3 (d) のように配置し実験を行った。そのときの試料の配置方法を表 4.4 に示す。
- (e) 実際のラック式倉庫で採られている配置は、可燃物間の垂直距離 $S_H/D=1/10$ と極めて小さい。これを 10cm 四方の段ボールブロックで実験する場合、実験実施上極めて困難であり、誤差を多く含むと予想される。この誤差をできるだけ少なくするためには、実験の縮尺率を大きくする必要がある。そこで、30cm 四方の段ボールブロックを使って、実際のラック式倉庫の配置により近い状態の縮尺模型実験を行う。その配置方法は図 4.3(a)であり、間隔の設定は表 4.5 に示す。この実験は、火炎の高さが 6m 以上になると想定されたので、やむをえず屋外で実験を行った。



(a) 段ボール (ex.3x3x3 配置)

(b) 周囲不燃材

(c) +型

(d) ×型

図 4.3 可燃物の平面配置図 (各段同様、色付きが不燃材)

表 4.2 試料の配置方法 (実験条件(a))

実験名	構成	垂直距離 S_H/D	水平距離 S_V/D
1×1×3	1×1 個 3 段積み	0	—
	1×1 個 3 段積み	1/2	—
2×2×1	2×2 個 1 段積み	0	0
	2×2 個 1 段積み	2	1/3
	2×2 個 1 段積み	2	1/2
	2×2 個 1 段積み	2	1
2×2×2	2×2 個 2 段積み	0	0
	2×2 個 2 段積み	2	1/3
	2×2 個 2 段積み	2	1/2
	2×2 個 2 段積み	2	1
2×2×5	2×2 個 5 段積み	0	0
	2×2 個 5 段積み	1	1/3
3×3×3	3×3 個 3 段積み	0	0
	3×3 個 3 段積み	0	1/10
	3×3 個 3 段積み	0	1/3
	3×3 個 3 段積み	0	1/2
	3×3 個 3 段積み	0	3/4
	3×3 個 3 段積み	0	1
	3×3 個 3 段積み	1/2	0
	3×3 個 3 段積み	1/2	1/10
	3×3 個 3 段積み	1/2	1/3
	3×3 個 3 段積み	1/2	1/2
	3×3 個 3 段積み	1/2	3/4
	3×3 個 3 段積み	1/2	1
	3×3 個 3 段積み	1	0
	3×3 個 3 段積み	1	1/10
	3×3 個 3 段積み	1	1/3
	3×3 個 3 段積み	1	1/2
	3×3 個 3 段積み	1	3/4
	3×3 個 3 段積み	1	1
	3×3 個 3 段積み	2	0
	3×3 個 3 段積み	2	1/10
3×3 個 3 段積み	2	1/3	
3×3 個 3 段積み	2	1/2	
3×3 個 3 段積み	2	3/4	
3×3 個 3 段積み	2	1	
3×3×5	3×3 個 5 段積み	2	0
	3×3 個 5 段積み	2	1/3
	3×3 個 5 段積み	2	1/2
	3×3 個 5 段積み	2	1
4×4×4	4×4 個 4 段積み	2	0
	4×4 個 4 段積み	2	1/3
	4×4 個 4 段積み	2	1/2
	4×4 個 4 段積み	2	1
5×5×5	5×5 個 5 段積み	0	0
	5×5 個 5 段積み	0	1/3
	5×5 個 5 段積み	0	1/2
	5×5 個 5 段積み	0	3/4
	5×5 個 5 段積み	0	1

表 4.3 試料の配置方法 (実験条件(b))

実験	構成	垂直距離 S_H/D	水平距離 S_V/D
3×3×3	3×3 個 3 段積み	0	0
	3×3 個 3 段積み	0	1/10
	3×3 個 3 段積み	0	1/3
	3×3 個 3 段積み	0	1/2
	3×3 個 3 段積み	0	3/4
	3×3 個 3 段積み	0	1
	3×3 個 3 段積み	1/2	0
	3×3 個 3 段積み	1/2	1/10
	3×3 個 3 段積み	1/2	1/3
	3×3 個 3 段積み	1/2	1/2
	3×3 個 3 段積み	1/2	3/4
	3×3 個 3 段積み	1/2	1
	3×3 個 3 段積み	1	0
	3×3 個 3 段積み	1	1/10
	3×3 個 3 段積み	1	1/3
	3×3 個 3 段積み	1	1/2
	3×3 個 3 段積み	1	3/4
	3×3 個 3 段積み	1	1
	3×3 個 3 段積み	2	0
	3×3 個 3 段積み	2	1/10
	3×3 個 3 段積み	2	1/3
3×3 個 3 段積み	2	1/2	
3×3 個 3 段積み	2	3/4	
3×3 個 3 段積み	2	1	

表 4.4 試料の配置方法 (実験条件(c),(d))

実験	構成	垂直距離 S_H/D	水平距離 S_V/D
3×3×3	3×3 個 3 段積み	1	0
	3×3 個 3 段積み	1	1/10
	3×3 個 3 段積み	1	1/3
	3×3 個 3 段積み	1	1/2
	3×3 個 3 段積み	1	3/4

表 4.5 試料の配置方法(実験条件(e))

実験	構成	垂直距離 S_H/D	水平距離 S_V/D
3×3×3	3×3 個 3 段積み	1/10	0
	3×3 個 3 段積み	1/10	1/3
	3×3 個 3 段積み	1/2	1/2
	3×3 個 3 段積み	3/2	3/4

4.5 結果及び考察

4.5.1 試料に含まれる水分量

今回、実験に用いた段ボールのような高分子物質の燃焼は、未燃物質が加熱を受け、熱分解の結果として生じた可燃性生成物が空気と混合し燃焼すると共に、その熱が再び未燃部分を加熱する過程である。加熱を受けた高分子物質は、まず含有水

表 4.6 段ボールブロックの含水率

測定日	平均含水率
5月6日	6.6%
8月5日	6.7%
8月9日	7.1%
9月17日	7.1%
9月24日	7.4%
11月4日	6.5%

分の蒸発や溶融といった吸熱過程を経て熱分解を起こす。したがって、今回の実験のように、高分子物質を使って燃焼実験を行う場合、その物質の含水率を知っておく必要がある。

測定は1回につき段ボールブロック3個ずつ用い、それらの含水率を求めた。段ボールブロック1個の平均含水率を表4.6に示す。表4.6より、実験に用いた室内で気乾状態にある段ボールブロックの平均含水率の変動は小さく、年間通して7%前後とほぼ一定しており、燃焼性状に与える影響は小さいと考えられる。

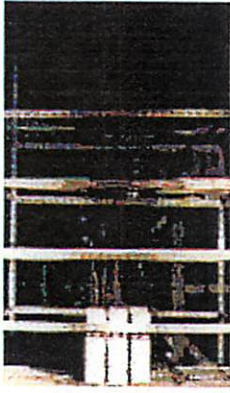
4.5.2 燃焼域の広がる様子

実験中、試料間隔の大小によって、燃焼域の広がり方に違いが観察された。図4.4~4.6に試料間の垂直距離を変化させた場合、図4.7~4.10に試料間の水平距離を変化させた場合の燃焼域の広がる様子をを示す。

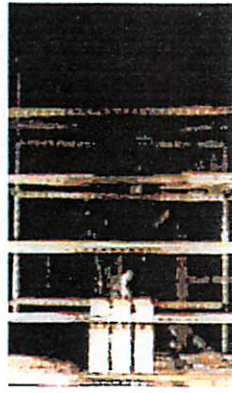
図4.4($3 \times 3 \times 3$ $S_H/D=0$ $S_V/D=1/3$ $D=10\text{cm}$)では、着火30秒後(図4.4①)に、試料(段ボールブロック)から煙が出始め、1分後(図4.4②)に3段目中央の試料に着火した。しかし、この時点では各段の外周(中央以外)の試料までは延焼していない。2分後(図4.4③)、外周の3段目の試料に着火し、炎は試料側面をすべり下りるように外周部の2段目、3段目の試料に広がり、試料全体が燃焼域に包まれた(図4.4④)。図4.5~4.6のケースの様に試料間の垂直距離が $S_H/D=1/2 \sim 2$ と大きくなると、着火2分後に外周部の3段目に達した炎は、試料の側面を伝って下方に広がるといったことはなく、最上端の3段目だけが燃えるといった状態となる。(図4.5-③、図4.6-③参照)。図4.5~4.6のケースは、炎が試料側面(表面)を伝って拡大しないが、堆積した試料全体が燃焼域に入るのは、図4.5のケースでは着火4分後、図4.6のケースでは着火3分後、垂直距離が全くない図4.4のケース(着火4分後)に比べて、同じかそれより早い時期に起こる。これは垂直距離があることにより、火源より上方に位置する試料は、火源から上昇してくる熱気流によって予備加熱を受けているため、着火しやすく、燃え広がり易くなっているからだと考えられる。

図4.7($3 \times 3 \times 3$ $S_H/D=1/2$, $S_V/D=0$ $D=10\text{cm}$)では、着火後約1分30秒間燻焼状態(写真4.2①~②)となり、試料表面が黒く焦げ始めた。その30秒後(写真4.7③)には、中央2段目配置した試料に着火し3段目から激しく煙を上げる状態となった。このとき、2段目の試料からでる火炎は主に試料の境界から出ており、炎が3段目に配置した試料の外側を回り込むような形で燃えていた。着火4分後には3段目に配置した試料に着火し、激しく炎を上げ燃焼状態となっていた。

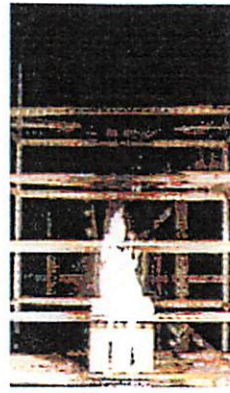
図4.8のケースの様に試料間の水平距離が $S_V/D=1/10$ とわずかに開くと、1段目中央に着火した炎は、試料の隙間に沿って伸び、2段目、3段目に配置した試料に着火する。(図4.8参照)。しかし、図4.9~図4.10のケースの様に試料間の水平距離が $S_V/D=1/2, 3/4$ と広がるにつれ、1段目中央に着火した炎が、試料の隙間に沿って伸びて上方に配置した試料に着火するといった現象は見られなくなった。この炎が伸びるといった現象は、試料間の隙間が狭いので、燃焼に必要な酸素(空気)の流入が制限され、この制限された空気と試料の分解生成ガスとの反応が完結するまで火炎は伸長するためと考えられる。



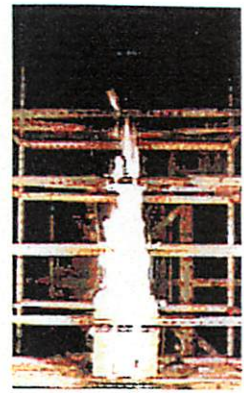
①着火 30 秒後



②着火 1 分後



③着火 2 分後



④着火 4 分後

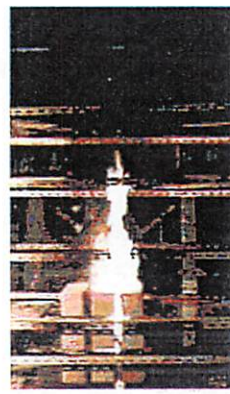
図 4.4 燃焼域の広がる様子($3 \times 3 \times 3$ $S_H/D=0$ $S_V/D=1/3$ $D=10\text{cm}$)



①着火 30 秒後



②着火 1 分後



③着火 2 分後



④着火 4 分後

図 4.5 燃焼域の広がる様子($3 \times 3 \times 3$ $S_H/D=1/2$ $S_V/D=1/3$ $D=10\text{cm}$)



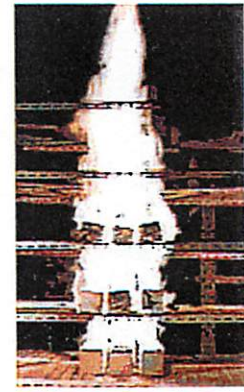
①着火 30 秒後



②着火 1 分後

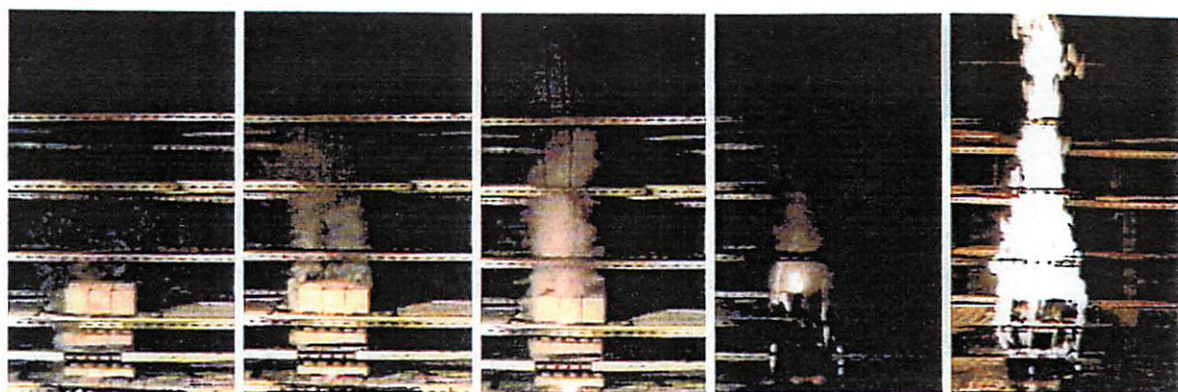


③着火 2 分後



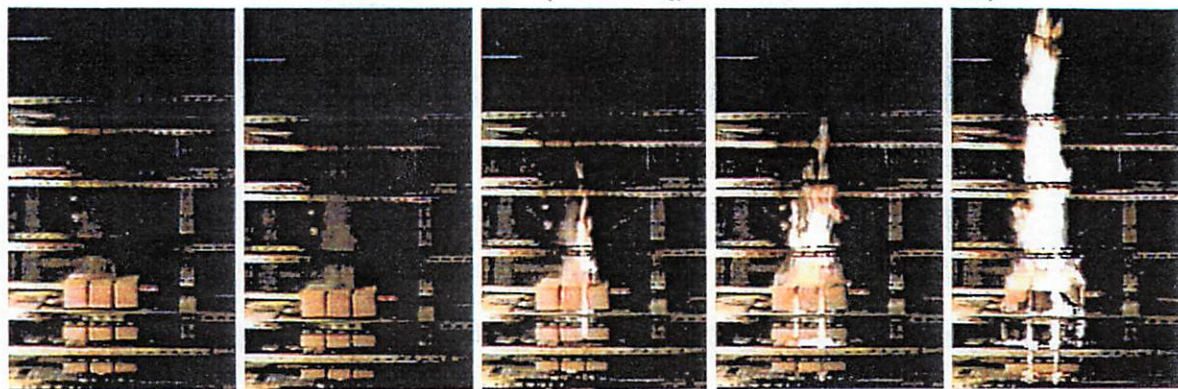
④着火 3 分後

図 4.6 燃焼域の広がる様子($3 \times 3 \times 3$ $S_H/D=2$ $S_V/D=1/3$ $D=10\text{cm}$)



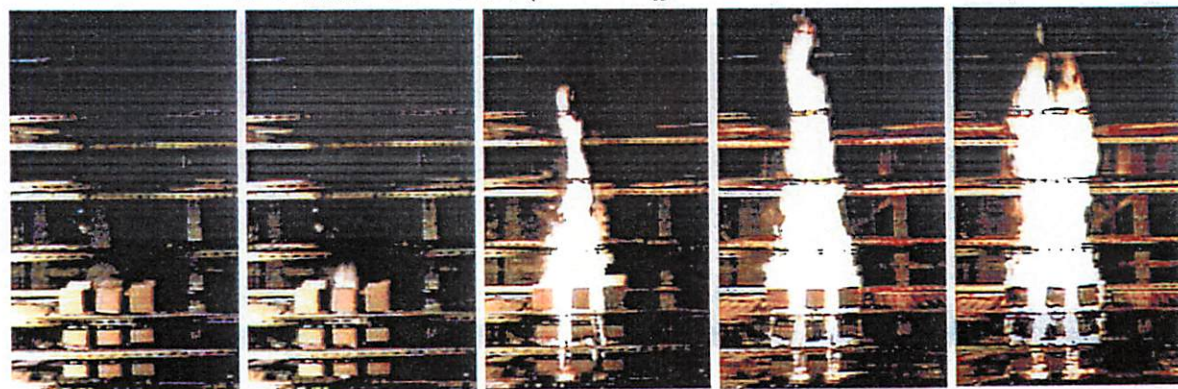
①着火 30 秒後 ②着火 1 分後 ③着火 1 分 30 秒後 ④着火 3 分後 ⑤着火 6 分後

図 4.7 燃焼の広がる様子($3 \times 3 \times 3$ $S_H/D=1/2$ $S_V/D=0$ $D=10\text{cm}$)



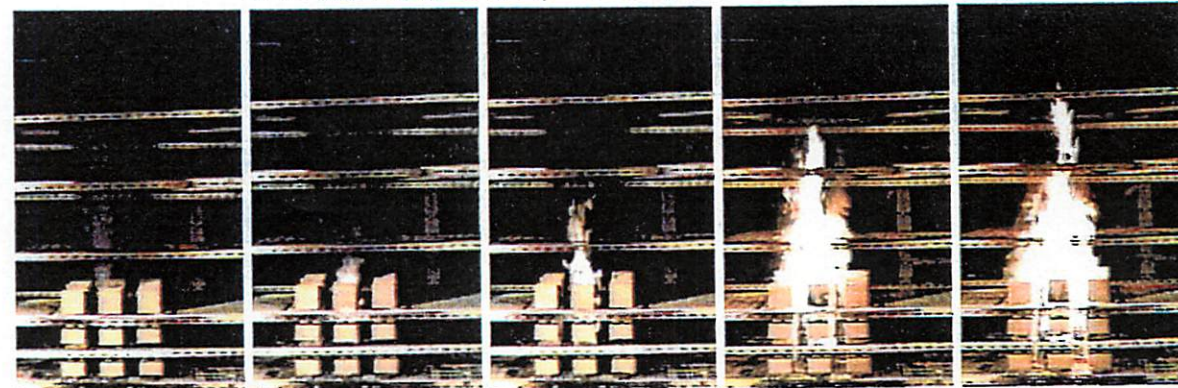
①着火 30 秒後 ②着火 1 分後 ③着火 2 分後 ④着火 2 分 30 秒後 ⑤着火 4 分後

図 4.8 燃焼の広がる様子($3 \times 3 \times 3$ $S_H/D=1/2$ $S_V/D=1/10$ $D=10\text{cm}$)



①着火 30 秒後 ②着火 3 分後 ③着火 4 分後 ④着火 5 分後 ⑤着火 6 分後

図 4.9 燃焼の広がる様子($3 \times 3 \times 3$ $S_H/D=1/2$ $S_V/D=1/2$ $D=10\text{cm}$)



①着火 30 秒後 ②着火 2 分後 ③着火 3 分 40 秒後 ④着火 4 分後 ⑤着火 4 分 40 秒後

図 4.10 燃焼の広がる様子($3 \times 3 \times 3$ $S_H/D=1/2$ $S_V/D=3/4$ $D=10\text{cm}$)

4.5.3 立体的に配置した可燃物の離隔距離が燃焼速度に及ぼす影響

一般に可燃物は燃焼の際、熱と光を発生する。燃焼に必要なのは、可燃物と空気(酸素)、熱(火源)であり、燃えやすさは空気の量に比例する。また、可燃物を高く積み上げ、下から火を付けた場合、上方に位置するものは、早くから予備加熱を受けるため燃焼しやすくなる。そこで、可燃物を立体的に配置した場合、可燃物間の距離が燃焼速度に及ぼす影響について、実験値をもとに考察する。

実験開始後、10秒毎に測定した重量減少量から燃焼速度(重量減少速度)を求めた。図4.11に代表的な燃焼速度 R_b の時間変化を示す。図4.11より試料の水平距離 S_v/D が狭くなるにつれ燃焼速度の最大値は大きくなる。また、 $S_v/D=0$ を除けば、その最大値が現れる時間も水平距離 S_v/D が狭くなるにつれ速くなる。試料間の距離が燃焼速度に影響を与えている事がわかる。

そこで、図4.12、図4.13に、それぞれ実験条件(a)における燃焼速度の最大値 $R_{b_{max}}$ (kg/s)を可燃物の初期載荷総重量 W_0 (kg)で規格化した $R_{b_{max}}/W_0$ と水平距離 S_v/D 、 $R_{b_{max}}/W_0$ と垂直距離 S_H/D との関係を示す。図4.12より、 S_H/D が大きくなるにつれ S_v/D の変化が大きく影響してくることがわかる。また、図4.13より、 $S_v/D \leq 1/2$ になると、 S_H/D が大きくなるにつれ、 $R_{b_{max}}/W_0$ が大きくなるが、 $S_v/D=3/4$ になると S_H/D の影響を受けにくくなる。 $S_v/D=1$ では、 $S_H/D \geq 1$ になると燃焼が継続せず、燃え残りが生じた。これらの燃焼速度の違いは、試料間距離による空気の流入量の変化と伝熱形態の違いによるためと考えられる。

そこで、周囲を不燃材で覆って、試料間距離だけを変化させ、それによる燃焼量の変化を見ることにした。

実験条件(b)における $R_{b_{max}}/W_0$ を求め、これを縦軸にとり、横軸に S_v/D をとったものを図4.14に示す。図4.14より $S_v/D \leq 1/3$ では、 S_v/D が大きくなるにつれ $R_{b_{max}}/W_0$ は大きくなる。しかし、 $S_v/D > 1/3$ になると、 $R_{b_{max}}/W_0$ は減少し、 $S_v/D \geq 1/2$ になると一定の値を採るようになる。また、 $S_H/D > 0$ である場合、 S_v/D が大きくなるにつれ、 S_H/D の影響は小さくなる。すなわち、燃焼速度は可燃物量が一定なら、燃焼域に巻き込まれる空気量に単純に比例するのではなく、可燃物と空気が適当な割合で分布するとき大きくなる。

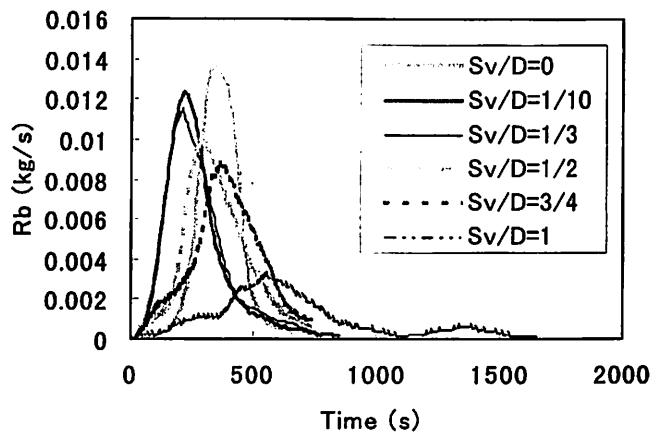


図4.11 燃焼速度の時間変化(3×3×3 $S_H/D=1$)

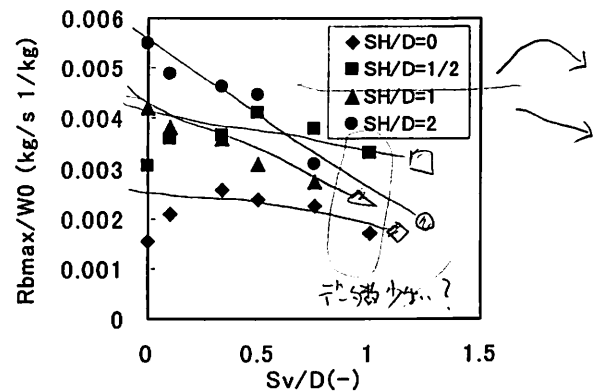


図4.12 最大燃焼速度と水平距離の関係 (実験条件(a))

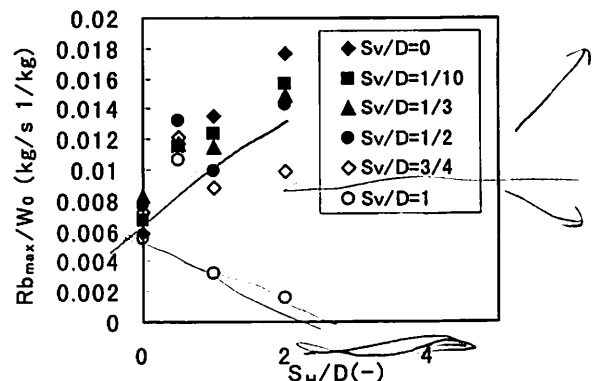


図4.13 最大燃焼速度と垂直距離の関係 (実験条件(a))

そこで、すべて段ボールブロックを用いた実験条件(a)については、試料全体が占める底部面積のうち試料が占める割合(可燃物の底部面積占有率)Aをとったものを横軸に、縦軸に単位重量あたりの最大燃焼速度をとったものを図 4.15 に示す。 $S_H/D > 0$ のとき A が大きくなるほど、言い換えれば S_V/D が小さくなるほど最大燃焼速度は大きくなっている。平面上に可燃物が高い割合で配置されている場合 Rb_{max}/W_0 は、大きくなる。単位重量当たりの最大燃焼速度と A の関係は(4.2)式のようになる。

$$\frac{1}{W_0} \cdot Rb_{max} \propto (A)^{1/2} \quad (4.2)$$

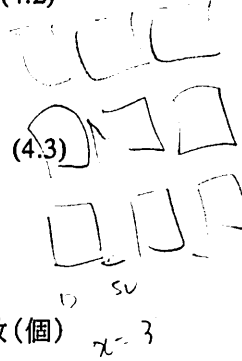
ここで、

$$A = \frac{x^2 \cdot D^2}{(x \cdot D + (x-1) \cdot S_V)^2} \quad (4.3)$$

Rb_{max} : 最大燃焼速度(kg/s)

W_0 : 可燃物の初期载荷重量(kg)

x: 水平方向に並べた可燃物の数(個)



次に垂直距離 S_H が、燃焼速度に及ぼす影響について、図 4.16 の様に表した。図 4.16 の横軸は、試料を積み上げた全体の高さのうち試料が占める割合(可燃物の高さ占有率)H であり、縦軸は単位重量当たりの最大燃焼速度である。図 4.16 より、H が大きくなると、単位重量当たりの燃焼速度は小さくなる^{↑分には空間が空っぽになる}ことがわかる。すなわち、垂直距離 S_H が大きくなれば燃焼速度も大きくなる。単位重量当たりの最大燃焼速度と H との関係は次式の様になる。

$$\frac{1}{W_0} \cdot Rb_{max} \propto (H)^{-1} \quad (4.4)$$

ここで

$$H = \frac{y \cdot D}{(y \cdot D + (y-1) \cdot S_H)} \quad (4.5)$$

y: 垂直方向に並べた可燃物の数(個)

堆積した可燃物全体がしめる空間堆積のうち、可燃物の占める割合(可燃物の充填率)を Ψ で表現するために、(4.2)、(4.4)式より、次のような展開を行った。

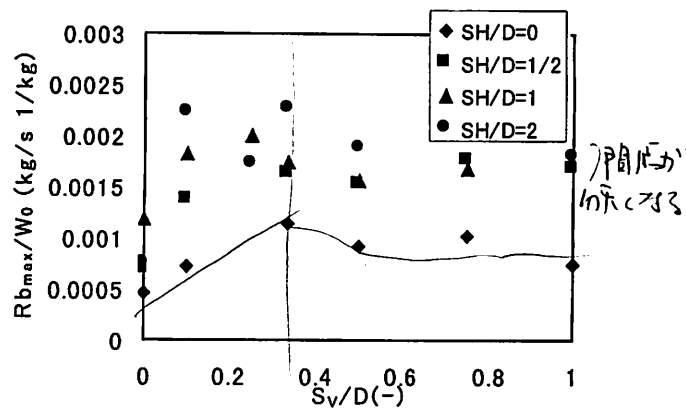


図 4.14 最大燃焼速度と水平距離の関係(実験条件(b))

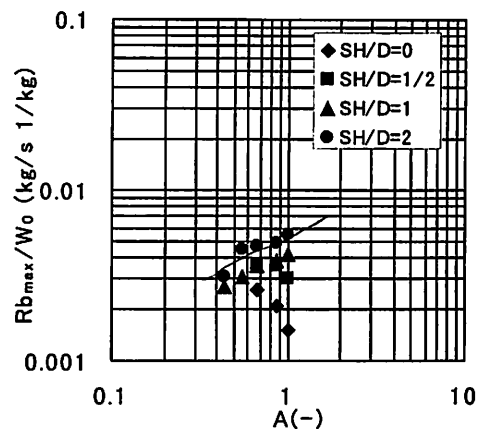


図 4.15 最大燃焼速度と A との関係

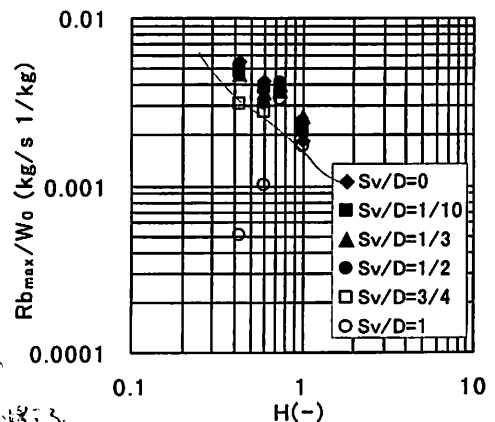


図 4.16 最大燃焼速度と H との関係(実験条件(a))

$$\frac{1}{W_0} \cdot Rb_{\max} \propto (A \cdot H)^{-1} \times A^{3/2} \quad (4.6)$$

すなわち

$$\frac{1}{W_0} \cdot Rb_{\max} \propto \frac{1}{\Psi} \cdot (A)^{3/2} \quad (4.7)$$

あるいは

$$\left(\frac{1}{A}\right)^{3/2} \times \left(\frac{1}{W_0} \cdot Rb_{\max}\right) \propto \Psi^{-1} \quad (4.8)$$

と表すことができる。ここで

$$\left(\frac{1}{A}\right)^{3/2} = \left(1 + \frac{2(x-1)}{x} \left(\frac{S_v}{D}\right) + \left(\frac{x-1}{x}\right)^2 \left(\frac{S_v}{D}\right)^2\right)^{3/2} \quad (4.9)$$

$$\Psi = \frac{x^2 \cdot y \cdot D^3}{(x \cdot D + (x-1) \cdot S_v)^2 (y \cdot D + (y-1) \cdot S_H)} \quad (4.10)$$

単位重量当たりの最大発熱速度と充填率 Ψ の関係は図 4.17 に示すようにばらついていたが、縦軸を、(4.9)式を用いて補正すると、図 4.18 の様になり、一本の直線上に集まってくる。

単位重量当たりの最大燃焼速度を補正する因子 $1/A$ は可燃物の底部面積占有率の逆数であり、対流伝熱の依存項 S_v/D と放射伝熱の依存項 $(S_v/D)^2$ の和として表すことができる。 S_v/D は水平方向に並べた可燃物の隙間数の 2 倍、 $(S_v/D)^2$ は水平方向に並べた可燃物の隙間数の 2 乗の割合で影響を受けると考えられる。

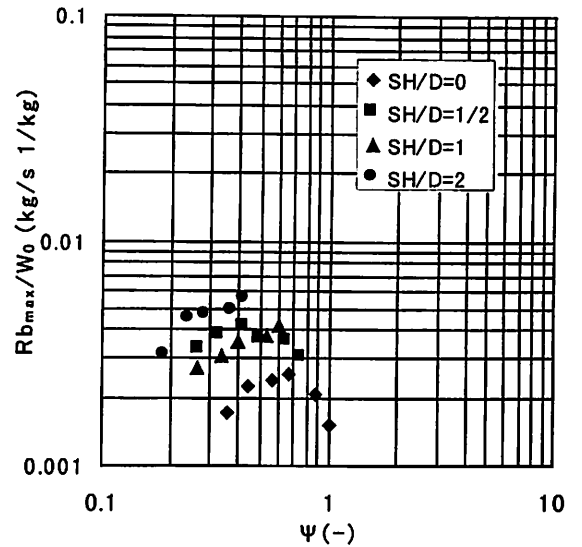


図 4.17 最大燃焼速度と Ψ との関係
(実験条件(a))

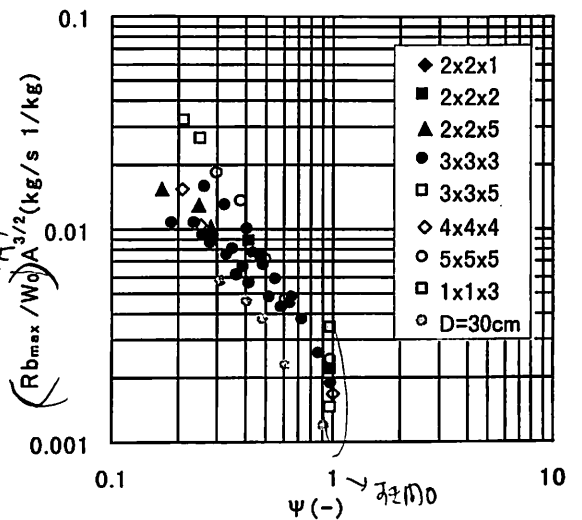


図 4.18 最大燃焼速度と Ψ との関係
(実験条件(a))

4.5.4 立体的に配置した可燃物の離隔距離が火炎高さに及ぼす影響

ラック内における火炎高さは、可燃物の配置に大きく影響を受ける。つまり一つの火炎領域がその周辺にある他の火炎や隙間等の開口との位置関係により、火炎域に流入する周辺空気が制限を受け、結果として火炎が伸長する現象が起こると考えられる。また、ある火炎ともう一つの火炎の距離が近いと火炎が融合する融合火炎が形成され、火炎が伸長する可能性も考えられる。

実験開始から 10 秒ごとに火炎先端高さを測定した。図 4.19 に代表的な火炎先端高さの時間変化を、燃焼速度の時間変化と共に示す。図 4.19 より、火炎高さと燃焼速度は非常に強い相関を示し、燃焼速度が大きくなれば、火炎高さは高くなる。つまり、発熱量が増大すれば、形成される火炎も大きくなる。火炎が大きくなれば、当然そこから発生する放射熱量も大きくなり、周囲の加害要因が大となる。

ここで、自由空間における一般的な火炎高さと発熱速度の無次元表現について述べる。

火源面上に形成されるプルームの任意の高さを通過する質量流量 \dot{m} (kg/s)とすると、ある高さでの発熱量 \dot{Q} (kW)は

$$\begin{aligned} \dot{Q} &\propto \dot{m} \cdot C_p \cdot T_0 \\ &\propto \dot{m} \cdot C_p \cdot T_0 \int \rho_p \cdot V_{up} \cdot dA \end{aligned} \quad (4.11)$$

と表される。さらに McCaffrey[17]によると、火炎・プルーム中心軸上の上昇速度 V_0 と高さ Z は火炎内において $V_0 \propto Z^{1/2}$ なる関係を持つので、平均火炎高さを L_f 、火源の代表長さを D_0 とするとその形状因子 L_f/D_0 を含めた形で次のように表現される。

$$V_{up} \propto V_0 \cdot \left(\frac{L_f}{D_0} \right)^{1/2} \quad (4.12)$$

火炎の表面積や周辺空気の巻き込み量も火源形状に依存すると考えられ、プルームの広がりも仮に形状因子 L_f/D_0 の n 乗に比例するとすれば(4.12)式は

$$\dot{Q} \propto C_p \cdot T_0 \cdot \rho_0 \cdot V_0 \cdot D_0^2 \cdot \left(\frac{L_f}{D_0} \right)^{1/2+n} \quad (4.13)$$

となり、規格速度 V_0 について火炎・プルーム領域内ではフルード数が一定であることにより成り立ち、平均火炎高さを火源径で除した無次元火炎高さは、(4.13)式を変形して無次元発熱速度 Q^* を用いて次のようになる。

$$\begin{aligned} \left(\frac{L_f}{D_0} \right) &\propto Q^* \left(\frac{2}{2n+1} \right) \\ Q^* &= \frac{\dot{Q}}{C_p \cdot T_0 \cdot \rho_0 \cdot g^{1/2} \cdot D_0^{5/2}} \end{aligned} \quad (4.14)$$

ここで、円形・正方火源の場合は $n=2$ 、線状あるいは矩形火源の場合は、 $n=1$ をとり、その場合の無次元火炎高さは

$$\text{円形・正方火源} \quad \left(\frac{L_f}{D_0} \right) = \alpha_1 \cdot Q^{2/5} \quad (4.15)$$

$$\text{線形火源} \quad \left(\frac{L_f}{D_0} \right) = \alpha_2 \cdot Q^{2/3} \quad (4.16)$$

のようになる。 α は実験によって求められる定数であり、 $\alpha_1=3.3$ 、 $\alpha_2=2.9$ とされる。¹⁷⁾

ただし、 C_p : 雰囲気気体の比熱 (kJ/kgK)、 T_0 : 雰囲気気温度 (K)、 ρ_0 : 雰囲気気体の密度 (kg/m³)、 V_{up} : プルーム軸上上昇気流速度、 g : 重力加速度 (9.8m/s²)、 L_f : 平均火炎高さ(m)、 D_0 : 火源の代表径(m)

実験条件(a)~(e)の実験で得られた火炎高さの最大値と最大燃焼速度に段ボールの発熱量(1.604

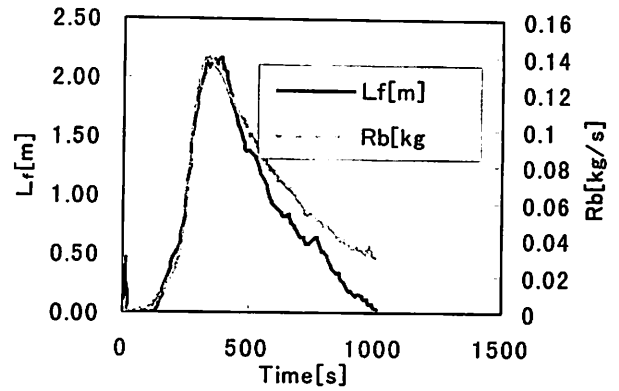


図 4.19 火炎高さの時間変化

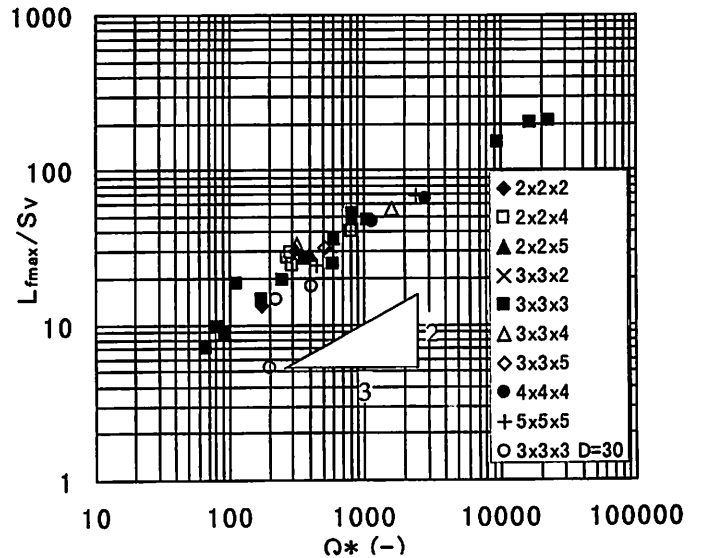


図 4.20 無次元火炎高さと無次元発熱速度の関係(実験条件(a))

$\times 10^4$ kJ/kg)を乗じて発熱速度としたもとの関係を無次元数で表す。本実験で形成された火炎は、試料間の隙間から噴き出していたので、試料間の水平距離 S_v (m)を火源の代表径として用いた。この際、 $S_v=0$ のケースは、除いた。

図 4.20 には、実験条件(a)と(e)、図 4.21 には実験条件(b)、図 4.22 には実験条件(c)と(d)の無次元火炎高さ L_{fmax}/S_v と無次元発熱速度 Q^* の関係を示す。

実験条件(a)(e)について図 4.20 を見てみると、 $Q^* \geq 60$ の範囲において、 $S_v/D \geq 1/10$ では、つまり試料間の水平距離が試料の代表長さの $1/10$ 以上保たれる場合は、無次元火炎高さ L_{fmax}/S_v は無次元発熱速度 Q^* の $3/2$ 乗に比例している。この時(4.14)式において $n=1$ となる。その関係式は次のようである。

$$L_{fmax} / S_v = 0.4 \cdot Q^{*2/3} \quad (4.17)$$

実験条件(a)(e)のように、平面上に可燃物を S_v だけ離して配置した場合、形成される炎は線状火源の性質を持つ。これは、前にも述べたが、炎が可燃物間の水平距離 S_v から噴出しているためだと考えられる。

次に、実験条件(b)について図 4.21 を見てみると、 $3 < Q^* < 4000$ の範囲において、 L_{fmax}/S_v は Q^* の $5/2$ 乗に比例する。この時(4.14)式において $n=2$ である。実験条件(b)のように可燃物を積み上げ、その周囲を同じ大きさの不燃材で囲んだ場合、その時形成される炎は正方火源の性質を持つようになる。その関係式は次式に示す。

$$L_{fmax} / S_v = 2.3 \cdot Q^{*2/5} \quad (4.18)$$

Sugawa[18]によれば、実験条件(c)(d) のように、可燃物の配置方法が線状でも正方形でもない場合は、(4.14)式において、 $1 < n < 2$ になるとしている。本研究においても、図 4.22 を見てみると、 $40 < Q^* < 2000$ の範囲において、 L_{fmax}/S_v は Q^* の $1/2$ 乗に比例している。 $n=1/2$ となる。

$$L_{fmax} / S_v = 1.3 \cdot Q^{*1/2} \quad (4.19)$$

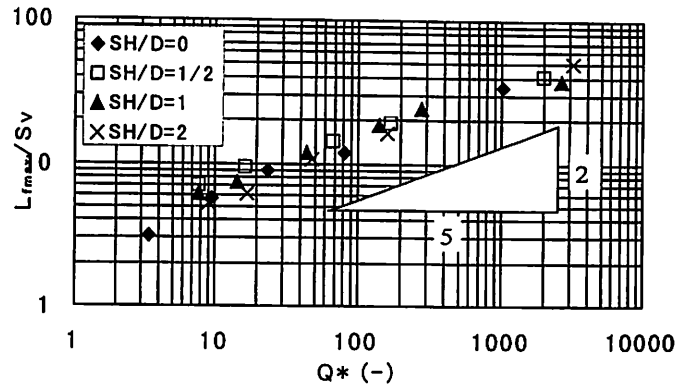


図 4.21 無次元火炎高さと無次元発熱速度の関係 (実験条件(b))

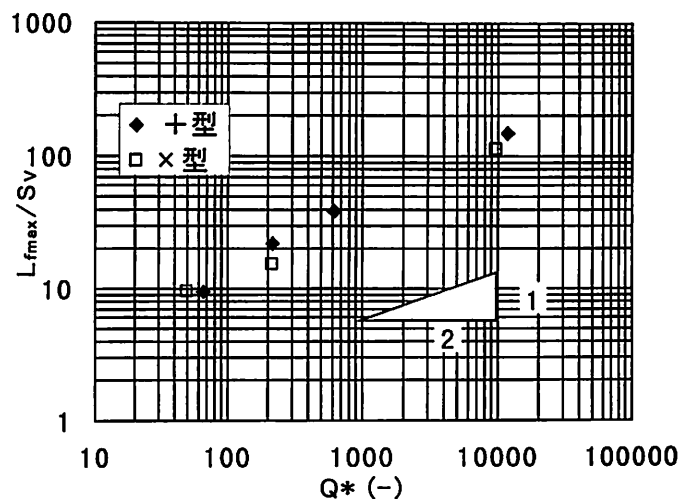


図 4.22 無次元火炎高さと無次元発熱速度の関係 (実験条件(c,d))

4.5.5 立体的に配置した可燃物の離隔距離が温度分布に及ぼす影響

ラック内の温度分布は、火災性状を明らかにするために必要であるだけでなく、スプリンクラーの作動温度といった消火・防火設備の有効性を評価するためにも必要である。ここでは、立体的に配置した可燃物の離隔距離(隙間)が温度分布に及ぼす影響について考察していく。

一般に火炎周囲になにもない自由空間における面火源上に形成される火炎及び浮力で上昇する熱気流(プルーム)は周辺空気を巻き込みながらその領域を広げ、火源径を中心とした軸対象な倒立円錐形となる。McCaffery[19]によると雰囲気温度が一定ならば火源の中心軸上の温度上昇 ΔT_0 については、火源からの高さ Z と発熱速度 Q で(4.20)式でまとめられ、

$$\Delta T = \beta \cdot (Z/Q^{2/5})^{2n-1} \quad (4.20)$$

連続火炎領域、間歇火炎領域、プルーム領域の各領域において次のような関係がある。

連続火炎領域 ($Z/Q^{2/5} \leq 0.08$) では $n=1/2$

間歇火炎領域 ($0.08 \leq Z/Q^{2/5} \leq 0.2$) では $n=0$

プルーム領域 ($0.2 \leq Z/Q^{2/5}$) では $n=-1/3$

しかし、本実験では 4.2.4.3 で、堆積した可燃物上に形成される火炎の高さは、線状火源上にできた火炎高さとしての性質を持つ事が明らかになった。発熱源が長く線状に分布する無限線火源の場合に形成される火炎及び浮力で上昇する熱気流(プルーム)は、周辺空気を巻き込みながらその領域を広げ、倒立の楔型となるとされている。Yokoi[20]によると無限線熱源上の上昇気流では、温度は高さに比例して低下するとしている。その関係は次式のように示されている。

$$\Delta T = 0.663 \left(\frac{T_\infty \cdot \dot{Q}^2}{C_p^2 \cdot \rho^2 \cdot g} \right)^{1/3} \cdot c^{-4/9} \cdot Z^{-1} \quad (4.21)$$

ただし、 \dot{Q} は線熱源の単位長さあたりの発熱速度、 c は火炎の乱れを表すパラメータである。

本実験では、ラック内の温度分布を、図 4.2 に示す①～④の 4 地点で測定した。図 4.24、に代表的な ($3 \times 3 \times 3$ $S_H/D=1/2$, $S_V/D=1/10 \sim 1$ $D=10\text{cm}$) ①の地点における垂直方向の温度分布を示す。縦軸は、雰囲気温度からの上昇温度 $\Delta T(\text{K})$ であり、横軸は、ラックの最下部からの高さ $Z(\text{m})$ を発熱速度の $2/5$ 乗で規格化したものである。

図 4.24 より、その高さ方向の温度分布は、 $Z/Q^{2/5}$ が 0.1 以下の領域において、800~900K と一定の値を採り、 $Z/Q^{2/5}$ が 0.1 より大きくなると高さの $3/2$ 乗で減衰している。これは、McCaffery のモデルよりも、Yokoi のモデルによく一致している。

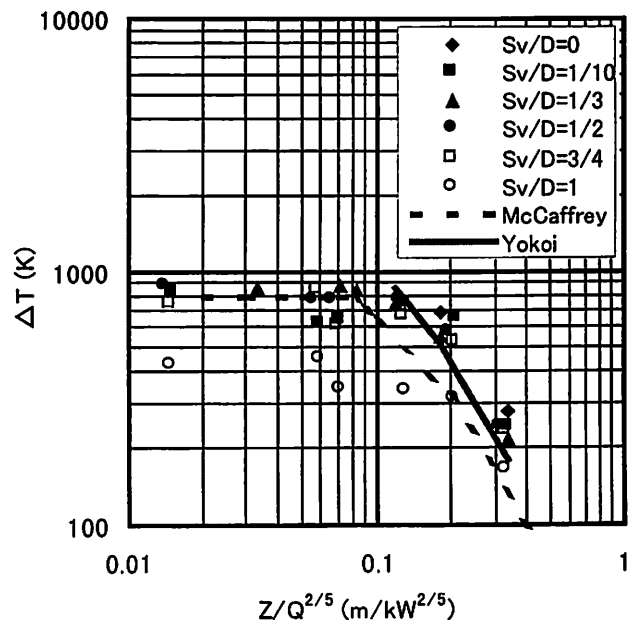


図 4.24 高さ方向の温度分布(実験条件(a)
 $3 \times 3 \times 3$ $S_H/D=1/2$, $S_V/D=1/10 \sim 1$)

つまり、試料間の隙間から炎が噴出しているので、見かけ上線状火源とり、線状火源の温度特性を示すと考えられる。図 4.24 より、垂直方向の温度分布と火炎高さの関係は、次式のようになる。

$$\begin{aligned} Z/Q^{2/5} \leq 0.1 \quad \Delta T = 800 \sim 900 \\ Z/Q^{2/5} > 0.1 \quad \Delta T = 40 \cdot \left(\frac{Z}{Q^{2/5}} \right)^{-3/2} \quad (4.22) \end{aligned}$$

4.6 まとめ

立体的に離隔距離を持って配置された可燃物の燃焼性状を明らかにするため、可燃物の数、大きさ、可燃物間の水平距離 S_v 、垂直距離 S_H 、積み上げ高さをパラメータとして変化させた燃焼実験を行った結果、以下のことが明らかになった。

- 可燃物間の水平距離 $S_v/D \leq 1/3$ の場合、燃焼に必要な酸素(空気)の供給に影響を与え、燃焼速度は小さくなる。 $S_v/D \geq 1/2$ になれば、燃焼に必要な酸素の供給にほとんど影響しない。
- 単位重量当たりの最大燃焼速度と可燃物の底部面積占有率 A との相関が得られ、単位重量当たりの最大燃焼速度は A の $1/2$ 乗に比例する。
- 単位重量当たりの最大燃焼速度と可燃物の高さ占有率 H との相関が得られ、単位重量当たりの最大燃焼速度は H の -1 乗に比例する。
- さまざまな配置をとる可燃物に対して、単位重量当たりの燃焼速度を A の $-3/2$ 乗で補正することによって、可燃物の充填率と相関を得ることができる。
- 単位重量当たりの最大燃焼速度を補正する因子 $A^{-3/2}$ は可燃物の底部面積占有率の逆数であり、対流伝熱の依存項 S_v/D と放射伝熱の依存項 $(S_v/D)^2$ の和である。 S_v/D は水平方向に並べた可燃物の隙間数の 2 倍、 $(S_v/D)^2$ は水平方向に並べた可燃物の隙間数の 2 乗の割合で影響を受ける。
- 可燃物間の水平距離が試料の代表長さの $1/10$ 以上保たれる場合、堆積した可燃物の上端に形成される火炎の高さの最大値 L_{rmax} を水平距離 S_v で規格化した無次元火炎高さ L_{rmax}/S_v は、無次元発熱速度 Q^* の $3/2$ 乗に比例し、線状火源の特性を示す。
- 立体的に離隔距離を持って配置された可燃物間の垂直方向の温度分布は、堆積可燃物の底部からの高さ Z と発熱速度 Q で表すことができ、 $Z/Q^{2/5}$ が 0.1 以下の領域において、 $800 \sim 900K$ と一定の値を採り、 $Z/Q^{2/5}$ が 0.1 より大きくなると高さの $3/2$ 乗で減衰する。

第五章 結論

本研究では、ラック式倉庫の火災時燃焼性状を明らかにすることを目的とした。

第二章では、ラック式倉庫の件数、高さ、収容物の種類等の実態をまとめた。第三章では、ラック式倉庫のスプリンクラー設備基準について、日本、アメリカ、イギリスの基準を比較検討した。第四章では、ラック式倉庫を想定し縮小模型を使って燃焼実験を行い、ラック内の収容物の配置方法と燃焼速度、ラック内に形成される火炎の高さと無次元発熱速度、ラック内の高さ方向の温度分布についての相関を得ることができた。

本研究で行った実験を大規模なラック式倉庫全体である想定すれば、4.6.3 で得られた最大燃焼速度と可燃物の充填率の関係により、建物に対する最大火災負荷として考えることができる。すなわち、ラック式倉庫での収納方法が決まり、収容物の種類に基づいて発熱量が推定できれば、最大火災負荷がどれくらいであるか定量的に推定できる。最大火災負荷が決まれば、スプリンクラー等の消火設備を設けたとき、その消火能力が十分であるか設置間隔が適切であるかなど定量的評価法を構築する基礎を与えることができる。

現在の設置基準では、指定可燃物では 4m 以下毎に、それ以外は 6m 以下毎にスプリンクラーヘッドの配置が義務付けられており、一個のスプリンクラーヘッドが保護する段数は 2~3 段である場合が多い。この 3 段までの空間での燃焼拡大を抑制すること、即ち火災初期の段階としてはおおよそ 3 段までの火災規模が想定され、この段階での火災を抑止・鎮圧する事が意図されていると考えられる。本研究で行ったように収納物(可燃物)が 3 段程度堆積された中での火災拡大性状の把握とこれに基づくモデル化は、ラック式倉庫火災の初期段階での燃焼性状の定量的記述を可能にし、これを参照値に採れば、消火あるいは燃焼抑止を行った場合の効果を定量的に把握・評価する事を可能とする。

ラックへの収納物構成(可燃物の種類、量、収納規模)が決まり、設計段階でのスプリンクラーヘッドの設置高さや作動温度がわかれば、4.6.5 で得られた高さ方向の温度と発熱量の関係式より、スプリンクラーが作動するのに必要な発熱速度がどれくらいかわかる。即ち、初期火災規模として留めておかなければならない燃焼規模を推定する事ができる。

発熱速度が同じでも、出火位置や収容物の配置方法によってスプリンクラーの作動が遅れたり、その効果も異なる事が懸念される。例えば、収容物間隔が大きい場合にはスプリンクラーで消火できても、収容物間隔が小さいと、スプリンクラーが作動する前に隣の収容物に延焼し、スプリンクラーが作動した時点では消火が困難となる可能性がある。単に 3 段毎に防災機器を設備するのではなく、倉庫の収納物の配置状態や荷姿や物質種によって設置すべき適切なスプリンクラーヘッド個数や間隔を設計するに必要な技術を構築するに必要な基礎を与えた。

しかしながら、本研究で得られた結果は、著しい熱可塑性をもたない収容物については適用できるが、熱可塑性プラスチック類を収容する場合は、適用できない。これは燃焼拡大が熔融燃焼物の滴下によってもたらされたためである。今後、この点は更なる研究の必要性がある。

謝辞

本研究は、終始身に余る懇切丁寧なご指導を賜った元名古屋大学工学部 辻本誠教授（現在、建設省建築研究所防火調整官）、並びに研究の方向付けから発表に方法に至るまで、詳細な助言とご指導を下された東京理科大学火災科学研究所 須川修身助教授に厚く御礼申し上げます。

所属していた辻本誠教授退職後、他専門の私を暖かく迎えて頂き、数々のご指導を頂いた名古屋大学工学部 河野守助教授に心より感謝申し上げます。

名古屋大学工学部 永井久也助手には数々の助言を賜り心より感謝いたします。

実験の実施ならびに本研究をまとめるにあたり数々の助言を頂きました元大日本土木(株)技術研究員 高橋済氏には心より感謝いたします。

ラック式倉庫に関する貴重な資料をご提供下さいました、清水建設(株)掛川秀史氏、ニッセイ損害保険会社(株)本位田正平氏に深く感謝いたします。

すすまみれになりながらも早朝から深夜まで実験を行い研究を共にしてきた、台湾消防署 陳文龍科長、最後の最後まで協力してくれた、東京理科大学理工学部工業化学科卒研究生 齋藤徹君に深く感謝します。

私と共に研究室生活を送り、共に本年度において修士課程を修了する、謝 北南さんは、おいしい中国料理の作り方を、飯村龍君、森俊洋君、服部誠君は、建築学から政治・経済に至る様々なことを教えてくれました。楽しい研究室生活をありがとう。

最後に私事ではありますが、陰ながら厚い愛情と好意を持って暖かく見守り下さいました両親と兄弟に心より感謝の意を表すと共に、いつか恩返しができるよう努力して行くつもりです。

本研究はこれらの数多くの方々のご指導、御支援の結果達成されたものであり。改めて深く感謝致します。

1998年2月12日

名古屋大学大学院工学研究科地圏環境工学工学専攻

酒井規公子

参考文献

- 1) Thomas A.LENTON.:SPI Fire Tests of Stored Plastics in Warehouses, FIRE JOURNAL May,1979 p30-35,
- 2) Herbert J.Kolodner. : Emergnency Operations In High-Rack Warehouses, FIRE JOURNAL May,1982,p63-65
- 3) Cheng Yao :The ESFR Sprinkler System A New Approach to High-Challenge Storage Protection, FIRE JOURNAL March,1985,p30-33
- 4) Iqbal S.Chopra. :UL the On-Off Sprinkler for Listing, FIRE JOURNAL November,1986,p19-22
- 5) Jmes L.Lee :Extinguishment of Rack Storage Fires of Corrugated Cartons Using Water, Fire Safety Science-Proceedings of the fifth international symposium,1995
- 6) Hong-Zeng You and Parakevas Stavrianidis. :The Transient Ceiling Flows of Growing Rack Storage Fire”, Fire Safety Science-Proceedings of the third international symposium,p281-290
- 7) Thomas,P.H., :Some Comments on Fire Spread in High Racked Storage of Goods, Department of Fire Safety Engineering, Lund University,1993.
- 8) Haukur Ingason. :Two Dimensional Rack Storage Fires,Fire Safety Science-Proceedings of the Fourth International symposium,1994,p1209-1220
- 9) Haukur Ingason. :Modelling of a Two Dimensional Rack Storage Fire,Submitted to Fire Safety Journal ,1996,p1-22
- 10) 運輸省総務審議官 :日本物流年間 1997,ぎょうせい出版,1997,p217~220
- 11) 武蔵工業大学立体自動倉庫調査グループ :立体・自動倉庫の実態調査,生産と運搬 1 月号,1975,p53~60
- 12) 社団法人日本損害保険協会安全技術部 :ラック式倉庫の火災危険に関する調査研究,1998,p31~33
- 13) 埼玉県比企広域消防本部 :東洋製罐(株)埼玉工場製品自動倉庫火災の出火原因調査報告書, 1996
- 14) 建築消防実務研究会 :建築消防 advice`96,新日本法規出版,1996,p33-1~33-21
- 15) 社団法人日本損害保険協会安全技術部 :スプリンクラー設備の設置基準 NFPA 基準 1995 出版
- 16) 社団法人日本損害保険協会安全技術部 :英国 BSI 基準スプリンクラー設備の設置基準 BS5306:PART2:1990,1996
- 17) Bernard McCaffrey :Flame Height, SFPE Handbook of FireProtection Engineering, NFPA , 1997, Section 1/Chapter 18,
- 18) Osami Sugawa and Yasushi Oka. :Flame Height from Rectangular Fire Sources Considering Mixing Factor, Fire Safety Science-Proceedings of the third international symposium,1993,p435-444
- 19) Bernard McCaffrey :NBSIR 79-1910, 1979
- 20) 横井鎮男 :建築物の火炎気流による延焼とその防止に関する研究,pp19-71
- 21) Paul E.Teague. :Ford Warehouse Fire Offers No Fire Protection Surprises, FIRE JOURNAL January,1979,p21-23

- 22) Robert Berns, : Not Enough Water, So Fire Guts 1,2-million-Square-Foot Warehouse, Fire Engineering August, 1982, p16-19
- 23) R.B.Ward : Survey of large fires in sprinkler and non-sprinklered warehouse and storage, Fire Prevention, 1985.3, p19-27
- 24) Michael S.Isner : \$49 Million Loss in Sherwin-Williams Warehouses Fire, FIRE JOURNAL March/April , 1988, p37-41
- 25) Michael S.Isner., : \$100 Million Fire Destroys Warehouses, FIRE JOURNAL , November/December , 1991, p37-41
- 26) FPA : FPA Casebook of fires, Fire Prevention 252 September, 1992, p46-55
- 27) 古積 博、中武 功 : 大府市「昭和丸全運輸(株)東海倉庫」火災について, 安全工学, vol.22 No.4, 1993, p220-226
- 28) 東京消防庁警防課 : 東京勝島倉庫爆発火災, 火災, vol.15 No.1, p41-44
- 29) 野田猛三郎 : 改造工事中、商品倉庫からたばこによって発生した火災, 火災, vol.21 No.3, p20-27
- 30) 村上保富 : 新興海陸運輸倉庫爆燃火災の概要, 火災, vol.28 No.2, p20-27
- 31) 森 正三 : 西ドイツ(ハンブルグ港)倉庫で大火災, 火災, vol.34 No.4, p20-27
- 32) 塚本孝一 : シューズ倉庫火災について, 火災, vol.41 No.5, p20-27
- 33) 上田 三夫、加藤武弘、山本勇 : 巨大な価値集積場—倉庫の火災リスクを考える, 予防時報, 142, 1985, p30-37
- 34) 菅原進一 : 西ドイツの自動車部品倉庫火災事故, 世界の重大産業災害, 1993.3, p24-27
- 35) 防災編集室 : 工場火災史上最大の損害を出したフォード倉庫火災, 防災 188 号, p28-30
- 36) 増田芳彦 : 一般倉庫の火災危険と対策, 安全工学, vol.22 No.4, 1993, p220-226
- 37) BRE : Fire protection of bin-storages, BRE News of Fire research, September, 1986
- 38) Russell P.Fleming. : Update on the Quick Response Sprinkler Research Project, FIRE JOURNAL January, 1987, p34-38
- 39) Edward K. : Developing an Early Suppression Design Procedure for Quick Response Sprinklers, FIRE JOURNAL November/December , 1989, p40-46
- 40) Leon Przybyla and Pravinray Gandhi. : The Results are in on Flammable Liquids in Plastic Containers, FIRE JOURNAL May/June , 1990, p39-43
- 41) 高橋 哲 : 二酸化炭素希釈空気による集積固体燃料火災の消火および燃焼継続酸素濃度, Bulletin of Japanese Association of Fire Science and Engineering, vol.41 No.1, 1992, p21-27
- 42) BRE, “ Sprinkler protection of storages”, BRE DIGEST 385 August, 1993
- 43) G.W.Gmurczyk. : Suppression Effectiveness of Extinguishing Agents Under Highly Dynamic Conditions, Fire Safety Science-Proceedings of the 4th international symposium, 1994, p925-936
- 44) G.D.Lougheed. : Full-Scale Fire Tests and the Development of Design Criteria for Sprinkler Protection of Mobile Shelving Units, Fire Technology First Quarter, 1994, p98-133
- 45) Tak-Sang Chan Hsiang-Cheng Kung, Hong-Zeng You. : Extinguishment Study of Actual Delivered Density for Rack Storage Fires, Fire Safety Science-Proceedings of the 4th international symposium, 1994, p913-924

- 46) Hong-Zeng You, James L. LEE and Hsiang-Cheng Kung, :Suppression of Rack Storage Fires by Water, Fire Safety Science-Proceedings of the 4th international symposium,1994,p901-912
- 47) Haukur Ingason. :Numerical simulation of the Wind Shadow Effect on the Convective Heat transfer to Glass Bulb Sprinklers,Fire Safety Journal 22,1994,p329-340
- 48) Haukur Ingason. :Numerical simulation of the Wind Shadow Effect on the Convective Heat transfer to Glass Bulb Sprinklers,Fire Safety Journal 22,1994,p329-340
- 49) Douglas Rice. :Developments in Fire Sprinkler Technology,ISFST ,1997,p606-609
- 50) Hong-Zeng Yu. :Heat Absorption by Water in Rack-stored Corrugated Cardboard Carton Fires, Fire Safety Science-Proceedings of the fifth international symposium ,1997,p923-933
- 51) Hsiang-Cheng Kung, Hong-Zeng You., :Four-Tier Array Rack Storage Fire Tests with Fast-Response Prototype Sprinklers, Fire Safety Science-Proceedings of the fifth international symposium,1997
- 52) Ronald K. Dean.,“A Final Report on Fire Tests Involving Stored Plastics”,p55-65, Fire Technology,1975
- 53) Richard S.Johnson. : Controlling Plastic Materials Fires IN Warehouses, FIRE JOURNAL May,1977,p43-45
- 54) N.J.Alvares. :Analysis of Rack-Away High Rack Storage Fire, Fire Safety Science-Proceedings of the 4th international symposium,1994
- 55) S.D.Miles and G.Cox. :Modelling the Environmental Consequences of Fires in Warehouses , Fire Safety Science-Proceedings of the 4th international symposium,1994 ,p1221-32
- 56) Haukur Ingason. : CFD Simulation of Fire in Two Dimensional Rack Storage,INTERFLAM '96,1996,p209-215
- 57) Haukur Ingason. :In-Rack Fire Plumes, Fire Safety Science-Proceedings of the fifth international symposium,1997,p1-15
- 58) Haukur Ingason. : Flame Heat Transfer in Storage Geometries, Submitted to Fire Safety Journal,1996,p1-15
- 59) Haukur Ingason. :Investigation of Thermal Response of Glass Bulb Sprinklers using Plunge and Ramp Tests,Submitted to Fire Safety Journal 1996,p1-20
- 60) S.D.Miles and G.Cox. :Prediction of Fire Hazards Associated with Chemical Warehouses, Fire Safety Journal,1996,p265-287
- 61) Gunnar Heskestad. :Flame Heights of Fuel Arrays with Combustion in Depth,Fire Safety Science-Proceedings of the fifth international symposium,1997,p427-438
- 62) F.JIA,E.R.Galea. :The Prediction of Fire Propagation in Enclosure Fires, Fire Safety Science-Proceedings of the fifth international symposium ,1997,p436-450
- 63) BRE, : Rapid-acting sprinkler system for high-racked storage, BRE News of Fire research, January,1986

付録1 ラック内の温度測定位置(熱電対の位置)

表 A1.1 各熱電対の位置

水平間隔 S_v/D	AB間の距離[cm]	BC間の距離[cm]	CD間の距離[cm]
0	5	5	5
1/10	5.5	5.5	5.5
1/3	6.5	6.5	6.5
1/2	7.5	7.5	7.5
3/4	8.8	8.8	8.8
1	10	10	10

表 A1.2 各熱電対の高さ(実験条件(a),(c),(d))

A列	高さ[cm]	B列	高さ[cm]	C列	高さ[cm]	D列	高さ[cm]
Ch.1	35	Ch.9	5	Ch.19	5	Ch.25	5
Ch.2	45	Ch.10	15	Ch.20	15	Ch.26	15
Ch.3	60	Ch.11	25	Ch.21	25	Ch.27	25
Ch.4	70	Ch.12	35	Ch.22	35	Ch.28	35
Ch.5	80	Ch.13	45	Ch.23	45	Ch.29	45
Ch.6	110	Ch.14	60	Ch.24	55	Ch.30	55
Ch.7	175	Ch.15	75				
Ch.8	280	Ch.16	90				
		Ch.17	115				
		Ch.18	180				

表 A1.3 各熱電対の高さ(実験条件(b))

A列	高さ[cm]	B列	高さ[cm]	C列	高さ[cm]	D列	高さ[cm]
Ch.1	35	Ch.9	5	Ch.19	5	Ch.25	5
Ch.2	45	Ch.10	15	Ch.20	15	Ch.26	15
Ch.3	60	Ch.11	25	Ch.21	25	Ch.27	25
Ch.4	70	Ch.12	35	Ch.22	35	Ch.28	35
Ch.5	80	Ch.13	45	Ch.23	45	Ch.29	45
Ch.6	110	Ch.14	60	Ch.24	60	Ch.30	60
Ch.7	175	Ch.15	75				
Ch.8	280	Ch.16	110				
		Ch.17	135				
		Ch.18	180				

表 A1.4 電対の位置(実験条件(e))

水平間隔 S_v/D	AB間の距離[cm]	BC間の距離[cm]	CD間の距離[cm]
0	15	15	15
1/3	20	20	20
1/2	22.5	22.5	22.5

表 A1.5 各熱電対の高さ(実験条件(e) $S_H/D=1/10$ $S_V/D=0,1/3$)

A列	高さ[cm]	B列	高さ[cm]	C列	高さ[cm]	D列	高さ[cm]
Ch.1	31.5	Ch.9	15	Ch.17	15	Ch.24	15
Ch.2	67.5	Ch.10	48	Ch.18	48	Ch.25	48
Ch.3	105	Ch.11	81	Ch.19	81	Ch.26	81
Ch.4	150	Ch.12	123	Ch.20	123	Ch.27	123
Ch.5	200	Ch.13	173	Ch.21	173	Ch.28	173
Ch.6	250	Ch.14	223	Ch.22	223	Ch.29	223
Ch.7	300	Ch.15	273	Ch.23	273	Ch.30	273
Ch.8	350	Ch.16	323				

表 A1.6 各熱電対の高さ(実験条件(e) $S_H/D=1/2$ $S_V/D=1/2$)

A列	高さ[cm]	B列	高さ[cm]	C列	高さ[cm]	D列	高さ[cm]
Ch.1	35	Ch.9	15	Ch.17	15	Ch.24	15
Ch.2	80	Ch.10	65	Ch.18	65	Ch.25	65
Ch.3	105	Ch.11	105	Ch.19	105	Ch.26	105
Ch.4	150	Ch.12	123	Ch.20	123	Ch.27	123
Ch.5	200	Ch.13	173	Ch.21	173	Ch.28	173
Ch.6	250	Ch.14	223	Ch.22	223	Ch.29	223
Ch.7	300	Ch.15	273	Ch.23	273	Ch.30	273
Ch.8	350	Ch.16	323				

表 A1.7 各熱電対の高さ(実験条件(e) $S_H/D=3/2$ $S_V/D=1/2$)

A列	高さ[cm]	B列	高さ[cm]	C列	高さ[cm]	D列	高さ[cm]
Ch.1	50	Ch.9	15	Ch.17	15	Ch.24	15
Ch.2	125	Ch.10	90	Ch.18	90	Ch.25	90
Ch.3	180	Ch.11	165	Ch.19	165	Ch.26	165
Ch.4	225	Ch.12	220	Ch.20	220	Ch.27	220
Ch.5	275	Ch.13	270	Ch.21	270	Ch.28	270
Ch.6	325	Ch.14	320	Ch.22	320	Ch.29	320
Ch.7	375	Ch.15	370	Ch.23	370	Ch.30	370
Ch.8	425	Ch.16	420				