強制換気される密閉空間の火災性状に関する模型実験

燃焼の一般性状と一酸化炭素大量発生条件

A MODEL EXPERIMENTAL STUDY OF FORCE-VENTILATED FIRES
IN A HIGHLY AIR TIGHT ENCLOSUREGeneral characteristics of combustion and conditions
of a heavy carbon monoxide generation

水野 敬三*, 田中 聡**, 長谷見雄二***

Keizou MIZUNO, Satoshi TANAKA and Yuji HASEMI

An experimental study on force-ventilated fires was made using 50 cm cubic model box with methanol as the fuel. From the experimental results, it was found that carbon monoxide generation becomes significant for stoichiometric fuel to air ratio greater than 1.0. The rate of fuel vaporization, the major factor governing the stoichiometric ratio, is found to be determined by heat flux to the fuel surface. Combustion characteristics within a force-ventilated enclosure are influenced by ventilation conditions. Inlet conditions are more influential than outlet conditions. For modeling the combustion characteristics and heat balance, the interdependency of these two factors must be taken into account.

Keywords : liquid fuel, forced ventilation, carbon monoxide, fire, model experiment, air tightness
液体燃料, 強制換気, 一酸化炭素, 火災, 模型実験, 気密性

1. 序

パーソナル空調等の高品位空調システムやコンピューターのようなオフィスオートメーション用精密機器が導入された建築空間では, その使用目的から外気の侵入による影響, 特に温度変化や塵を極力抑え, さらに防音のためにも気密性を高くすることが要求される。また, 住居のような一般建築物においてもアルミサッシ等の工業生産される二次部材の使用や施工技術の向上によって, その気密性は高くなってきている¹⁾。さらに, 地下変電所や地下街に代表される地下空間施設や原子力施設, クリーンルーム等では, 無窓室となりがちなうえに自然換気を制限されるため, 空間の気密化の傾向は一層, 高まるものと考えられる。このように, 気密化が進んだ建築空間を居住, あるいは執務に利用する場合には, 通常, 強制換気が必要である。

気密性の高い建築空間で, 火災が発生したときに換気が停止される場合については数例の研究があり^{2), 3)}, その火災性状は, 燃焼に必要な酸素が不足してくると燃焼が緩慢になり, 不完全燃焼から自然鎮火に至ることが報

告されている。しかし, 強制換気される気密な空間の火災では, 建物管理者らによる火災対応活動が始まるまでは換気が維持されるし, 不適切な火災対応によって換気が続く可能性もある。しかも, 気密な空間に対しては機械防煙が適用される場合が少なくないから, 排煙ファンの運転や加圧煙制御により, 火災時にも強制換気が行われていることが十分に考えられる。

これまでの区画火災に関する研究は, 建物火災では一般に, 熱等でガラス等の開口部材が破壊された後は, 外気に直接通じる開口が火災区画に生じることを考慮して, 自然換気を伴った火災を扱うのが一般的であった。このような自然換気型火災では, 開口因子 $A_v\sqrt{H}$ によって, その火災性状を説明する手法が確立している^{4)~6)}。これに対して無窓居室, あるいは火災時に開口部材が破壊しないため気密性が保持されたままの空間については, 開口因子による火災性状の説明が成立しない。また, 火災安全上の問題点も, 自然換気型火災の場合には, 火災室で 1000°C 前後の高温が生ずることに由来するのが一般的であるのに対して, 気密性が高い建築空間

* 大成建設(株)技術研究所

** 東京理科大学 大学院生

*** 建設省建築研究所・工博

Technology Research Center, Taisei Corporation,
Graduate School, Science Univ. of Tokyo.

Building Research Institute, The Ministry of Construction, Dr. Eng.

では、燃焼に必要な酸素量の不足によって、有毒ガスである一酸化炭素や大量の煤が発生することが大きな問題となる可能性が大きい。

強制換気される密閉空間の火災性状については、Backovsky ら⁷⁾が実大に近い規模の実験を行っているが、その関心は換気方式や換気量、天井高さと火災時の室内の温度分布の関係など、火災時の熱的性状の把握に向けられていて、このような空間に特有な防火安全上の問題点や燃焼反応現象は取り扱われていない。また、須川⁸⁾は換気を極端に制限された区画火災の現象について、開口が少ない区画模型を用いて低酸素雰囲気中でのメタノールの燃焼性状について研究を行い、青白い火災が燃料表面から離れて漂う現象 (Ghosting-fire) について詳しい観察報告を行っている。しかし、Ghosting-fire は密閉空間に特有な燃焼現象であり、それに由来する防火安全上の問題点は少なくないと考えられるが、燃料蒸気が室内に大量に放出されるという、ある程度、特殊な条件のもとで発生する現象であるから、密閉空間火災の問題点や火災性状一般を代表するものとはいえない。一方、建物火災を想定した条件での一酸化炭素の発生状況については、Gross⁹⁾や Tewarson¹⁰⁾、Beyler¹¹⁾、守川¹²⁾らが各種材料の単位熱分解量当りの一酸化炭素発生量 (CO yield) を測定している。CO yield は、火災時における一酸化炭素濃度を予測・評価する際の最も基本的な原単位であるが、Gross⁹⁾や Tewarson¹⁰⁾、Beyler¹¹⁾らは、実験装置の開口面積や区画模型の規模等を変更することによって燃焼系への供給空気量を変えたりして、空気の供給が自然換気によって行われる状態での CO yield を測定した。なかでも Beyler¹¹⁾は火災時における一酸化炭素の発生は、燃焼物からの可燃性ガスの発生に対して換気による酸素供給が不足するための不完全燃焼によるものであると考えて、一酸化炭素の発生条件を、完全燃焼に必要な空気量と供給空気量の比 (当量比) との関係で整理している。これに対して守川¹²⁾は材料の側面から空気を機械的に供給し、上方に排気した強制換気される状態で、各種材料の CO yield の測定を行って、一酸化炭素の発生条件を材料の燃焼速度に対する供給空気量の割合 (l/g) で整理し、一酸化炭素の発生性状が換気量に大きく影響されることを示している。これらの研究では総じて可燃性ガスの生成速度は既知として扱われていて、可燃性ガスの生成がどのように決まるかは議論されていない。しかし、自然換気型火災に関する知見から類推すれば可燃性ガスの生成条件は燃焼物の物性や室の条件等に支配されることが容易に想像できる。

本研究では、強制換気される密閉空間での

火災性状を把握することを目的として、給気を機械的に行った内法一辺 50 cm の立方体の気密模型燃焼箱内で、換気方式と換気量を種々に変えた状態でメタノールを燃焼させる実験を行って、燃焼の一般性状と一酸化炭素が大量に発生する条件を支配する要因について検討した。このように小型の模型を用いたのは、上記のように問題とする現象の構造がほとんど把握されていない段階において、この種の空間でどのような現象が起こり得るかを概括的に知るためには、実験計画を適宜変更して繰返し測定を行うのに都合が良いからであり、メタノールを燃料としたのは、初期火災を対象とする模型実験で常套的に使われるため、その扱いが容易だからである。

2. 実験概要

2.1 実験装置と測定項目

実験に用いた装置は、空気供給システム、燃料供給システム、模型燃焼箱、およびガス分析器からなる。

模型燃焼箱は Fig.1 に示すように、立方体のステンレスの箱の内面に厚さ 35 mm の珪酸カルシウム板 (商品名: ケイカライト) を張り、内法一辺が 50 cm になるようにし、床面中央には周囲を厚さ 5 mm の珪酸カルシウム板で断熱したトレイ (寸法: 10 cm×10 cm, 15 cm×15 cm, 20 cm×20 cm の 3 種類、トレイの中央には熱流計挿入用管 (直径 2 cm) が貫通している。) を設置した。トレイの中には燃料表面への入射熱を測定するために Gardon 型熱流計 (ハイカルエンジニアリング社製 C-1301-A) を設置した。メタノールは燃料供給システムからこのトレイに供給し、燃料溜めの液面高さとトレイの液面高さを一致させ、その高さを一定に保ちながら燃焼させた。メタノールの消費量は荷重変換器 (NMB 社製 UT-1 K) にて測定した⁸⁾。四方の壁面には直径 10 cm の開口を 1 個ずつ設け、観察用の開口は耐熱ガラス

Fig.1 Model box setup

(パイレックス)で塞いだ。また、Fig.2に示すように換気用の開口の内側にはブリキ製のダクトや拡散板を設置することによって、換気方式(給気:上方, 中位, 中

位拡散, 下方, 排気:上方, 中位, 下方)を変えた。模型燃焼箱内の各部位, 並びに排気の温度は, 直径0.05 mmのクロメル-アルメル熱電対で測定した。さらに,

排気の一部を冷却器, およびフィルターを通して水分と煤分を除去してガス分析器に誘導し, 磁気力式酸素分析計(富士電機ZAJ型)にて酸素を, また赤外線ガス分析計にて一酸化炭素, 二酸化炭素(共に富士電機ZAL型), 炭化水素ガス(富士電機ZFU型)を連続測定した。

新鮮空気は, コンプレッサーから湿度等の影響を除去するためにドライヤー, およびフィルターを通して, マスフローコントローラー(STEC社SEF-623)にて20~100 l/minの範囲で所定の流量に調整し, 模型燃焼箱へ供給した。

2.2 実験結果

Fig.3に燃焼が持続し, 一酸化炭素が比較的大量に発生した実験の結果の一例を示す。また, Table 1に燃焼持続時間と実験中の一酸化炭素の最大濃度を示す。Fig.3に示した実験結果の実験条件は給気量80 l/min, 換気方式は中位拡散給気, 上方排

Fig.2 Inlet and outlet conditions (position and configuration.)

Fig.3 An example of experimental measurements ($G=80$ l/min, tray size 15 cm $\times$ 15 cm, middle inlet with baffle, upper outlet)

気でトレイの大きさは15 cm×15 cmであり、燃焼は点火後30分経過した時点で、空気の供給を停止して、強制的に鎮火させたものである。

この実験では、一酸化炭素の発生は点火後17分頃から始まり、このときの酸素濃度は4 (vol %)、二酸化炭素は12 (vol %)となっている。また、点火後25分以降では酸素はほとんど無く、この時期には一酸化炭素が増加すると二酸化炭素が減る傾向が見られる。点火後27分には、一酸化炭素の発生は、実験中の最大濃度である4 (vol %)に達している。なお、ガス分析器の測定精度を吟味するために点火後15分と27分における模型燃焼箱の酸素収支を調べた結果、給気中の酸素量に対して、完全燃焼に必要な酸素量と正味の過剰酸素量の和は、点火後15分で1%以下、27分では7%の誤差で一致した。

また、燃料表面への入射熱の変化を見ると、点火後2分間は大きい、その後は15(kW/m²)前後と小さくなっている。点火直後はあらかじめ箱内にあった新鮮空気が燃焼に関与するために、火炎の大きさは自由空間での燃焼とあまり変わらないでいる。しかし、その後は燃焼の持続に必要な新鮮空気量が不足するために燃焼が抑制されたものと考えられる。燃料重量減少速度の変化を見ると、点火後2分間は燃料表面への入射熱が大きいにもか

かわらず、燃料の蒸発量は少ない。そして火炎が小さくなった点火後3分で燃料の蒸発量はピークを示し、再び小さくなっている。これは点火直後では燃料が低温であるため、火炎から燃料への入熱は燃料の蒸発以外に燃料全体とトレイの両方の温度上昇に使われる。そして、燃料が温められた時点で燃料蒸発量は増加するが、燃焼の持続に必要な新鮮空気が不足する。その結果、燃焼が抑制され、燃料表面への入射熱が小さくなるために、直に燃料の蒸発量は少なくなったと考えられる。

新鮮空気の不足によって燃焼が抑制される場合には、Table 1に示したように、一酸化炭素が発生しなくても、燃焼が持続せずに鎮火してしまうものもある。

3. 一酸化炭素の発生性状

強制換気される密閉空間においては、Table 1に示すように、換気量不足等のために燃焼が持続せず鎮火してしまう場合や、一方、換気条件によっては1~5 (vol %)もの大量の一酸化炭素の発生を伴って燃焼が持続することもある。換気不足による自然鎮火も火災事例としては十分に検討されるべきではあるが、既往の研究^{2),3)}によれば、この場合の被害は火災室に限定されることが多いと考えられる。しかし、持続的な一酸化炭素の大量発生は、他の区画へ有毒ガス・可燃性ガスが拡散することを意味するから、人命安全上、重大な脅威となる。強制換気される密閉空間の火災において、燃焼が持続し、しかも一酸化炭素が大量に発生する条件を明らかにすることは、防火上、重要な課題であるので、まず、一酸化炭素の大量発生の有無がどのようなパラメーターで表現できるかを検討する。

3.1 密閉空間火災における一酸化炭素大量発生条件

一酸化炭素の発生の有無は、先にも述べたように燃焼系に対する酸素の供給量と可燃性ガスの発生量の比に大きく依存すると考えられている^{10),11),13),14)}。本実験で燃料として使用したメタノールが完全燃焼した場合の化学反応は、(A)のとおりである。

メタノールの燃焼に対して酸素の供給が不足すると、(B)のような化学反応が起こり、熱分解と酸化が十分に行われないために、中間生成物である一酸化炭素が放出されるが、一酸化炭素は人体に有毒であるだけでなく、新鮮空気中で着火すれば燃焼するので、ダクトを介した火災拡大の原因になる可能性がある。

本実験において蒸発したメタノールが完全燃焼するのに必要な空気量は、 $A_v \cdot m_v^* \cdot x$ (kg/s)と表せる。そして、(1)式に示すように $A_v \cdot m_v^* \cdot x$ と M の比は生成する可燃性ガスに対する給気量の度合い(当量比)を表すこと

Table 1 Experimental result of duration time and maximum concentration of carbon monoxide (tray size 15 cm×15 cm)

(a) G=20ℓ/min

Inlet Outlet	Upper	Middle	Middle with Baffle	Lower
Upper	1.03min 0.0vol%	1.19min 0.0vol%	1.58min 0.0vol%	5.54min 0.2vol%
Middle	0.95min 0.0vol%	1.27min 0.0vol%	3.80min 0.0vol%	1.58min 0.1vol%
Lower	0.87min 0.0vol%	1.03min 0.0vol%	1.27min 0.0vol%	2.38min 0.0vol%

(b) G=50ℓ/min

Inlet Outlet	Upper	Middle	Middle with Baffle	Lower
Upper	1.58min 0.0vol%	4.36min 0.0vol%	30min* 0.5vol%	30min* 4.9vol%
Middle	1.43min 0.0vol%	8.32min 0.0vol%	30min* 0.6vol%	30min* 2.7vol%
Lower	11.72min 0.0vol%	2.53min 0.0vol%	2.06min 0.0vol%	7.92min 0.2vol%

*)Extinguished combustion at 30min after ignition.

(c) G=80ℓ/min

Inlet Outlet	Upper	Middle	Middle with Baffle	Lower
Upper	30min* 0.0vol%	9.90min 0.0vol%	30min* 3.4vol%	30min* 4.6vol%
Middle	3.56min 0.0vol%	8.32min 0.0vol%	30min* 4.0vol%	30min* 4.3vol%
Lower	9.98min 0.0vol%	2.61min 0.0vol%	30min* 1.3vol%	30min* 0.6vol%

*)Extinguished combustion at 30min after ignition.

になる。

$$\Phi = A_v \cdot m_v'' \cdot x / M \cdots \cdots (1)$$

供給した酸素がすべて燃焼反応に消費されると仮定すると、 Φ が 1 以下では酸素供給過剰となり、燃料は完全燃焼する。 Φ が 1 以上では酸素供給不足となり、燃料は不完全燃焼し、一酸化炭素が発生すると考えられる。Tewarson¹⁰⁾ と Beyler¹¹⁾ は、 Φ と同様の化学的内容を持つ概念で CO yield との関連付けを行っている。しかし、彼らの提案したパラメーターでは、自然換気によって供給された空気量を用いていることから、供給空気量の把握に流量係数等の複雑な因子が入ってくるだけでなく、(1) 式に示した Φ と逆数の関係にあり、不完全燃焼が起こる領域が 0~1 の間になる。このため一酸化炭素が大量に発生するという防火上、最も関心がもたれる場合の実験条件と結果の関係の記述が、換気十分な場合に比較して粗雑になるという難点がある。

さて、Fig. 4 に燃焼持続時間 2 分以上の実験について、一酸化炭素の実験中の最大濃度を Φ に対してプロットしたものを示す。Fig. 4 から、燃焼が持続する場合、*、**印を附したものを除いて $\Phi=1.0$ を境界に、一酸化炭素がほとんど発生しない領域と顕著に発生する領域とに分かれていることが分かる。ここで*印は下方給気→下方排気、**印は中位拡散給気→下方排気の組合せであり、これらの条件でやや特異な結果となる原因については 4 章で考察する。

排気量と排気ガス成分から求めた一酸化炭素発生量を燃料重量減少速度で割って CO yield を求め、これを Φ に対してプロットすると Fig. 5 のようになる。図中の実線は、Beyler¹¹⁾ によって示されたメタノールについての Φ と CO yield の関係である。Beyler の実験では、CO yield は $\Phi=0.7$ 付近から大きくなり、 $\Phi=1.8$ において CO yield は 0.27 に漸近している。これに対して本実験の結果では、CO yield は $\Phi=1.0$ 付近から大き

くなり、 $\Phi=1.5$ 前後でピークを示した後、小さくなっている。CO yield のピークの大きさやオーダーは一致しているが CO yield が大きくなり始める Φ の値が、Beyler の実験の方が小さくなっている。これは、Beyler の実験では自然換気によって火源の周囲から燃焼に必要な新鮮空気を供給し、燃焼後のガスはフードの上方から排出しているため、燃焼によって上昇するガスに周囲の新鮮空気が巻き込まれ、燃焼に関与しない新鮮空気もフード内に取り込まれる。この結果、同じ燃焼量に対しては本実験の換気方式より多くの空気が換気に関与することになり、 Φ を構成する値のうち、分母である M が本実験で自然換気に類似した換気方式（下方給気→上方排気）の場合よりも大きくなる。このため、同じ CO yield に対して、本実験よりも Beyler の実験のほうが Φ の値が小さくなったと考えられる。

3.2 実験条件からのパラメーター Φ の推定について

本実験では、火源として液体のプール燃焼を用いているため、パラメーター Φ を構成する値のうち、 A_v を一定とすることができる。また、 x は化学反応式から求めることができ、空気中の酸素の質量百分率を 23.15 (wt %) とすると、メタノールの場合には 6.48 (g/g) となる。また、 M は人為的に設定することができるから、これも実験以前に既知の条件として与えられる。しかし、 m_v'' は当面、実験を行わなければ分からない値である。一酸化炭素大量発生を推定するためにパラメーター Φ を実験以前に既知な条件から求められるようにするには、 m_v'' を他の材料物性や実験パラメーター等と関係づける必要がある。

液体燃料の場合、燃焼が開始すれば燃料は火炎からの熱を受けて沸点近くまで温度が上がり、入射熱等の入熱に見合う量の燃料蒸気を発生し周囲の空気と混合して拡散燃焼する。本実験では、燃料への入熱をその蒸発面への入熱に限定するために、トレイ器壁の周囲に断熱材を

Fig. 4 Relation between maximum CO concentration and Φ

Fig. 5 Relation between CO yield and Φ

Fig. 6 Relation between heat flux to the fuel surface and heat of vaporization

設置してトレイ器壁からの熱伝導を抑えた。したがって、メタノールの蒸発に必要な熱は燃料表面への入射熱によって与えられ、燃焼が安定した段階では、蒸発熱と入射熱の大きさは、ほぼ等しいと考えられる。Fig. 6に燃料表面への入射熱と m_v'' にメタノールの蒸発熱を乗じて求めたメタノールの蒸発に要する熱との関係を示す。Fig. 6で燃焼持続時間が2分から10分のデータ (▲印) では、燃料表面への入射熱のほうがメタノールの蒸発に要した熱よりも大きくなっているが、これは初期の燃料への入射熱が燃料の蒸発以外に、トレイ中の燃料全体とトレイの温度を上昇させるのに使われるためと考えられる。燃焼持続時間が10分以上のデータ (○印) では、燃料表面への入射熱と m_v'' から求めたメタノールの蒸発に要する熱は、近い値となっている。このことから、本実験の条件で燃焼が10分以上持続する場合には、燃料表面への入射熱を予測することができれば、 m_v'' を求め、一酸化炭素の大量発生を推定することができると考えられる。

4. 換気方式の燃焼性状への影響

実験結果から、模型燃焼箱内の燃焼性状が換気方式によって質的な差を示すことが観察された。自然換気型火災では、一般に燃焼に使われる区画外からの常温の新鮮空気は燃焼部位の周囲、あるいは下方から供給され、燃焼ガスは上方へ移動して開口から排気される。これに対して、人為的に換気方式を設定できる場合には、自然換気型火災とは異なった形態で新鮮空気の供給と燃焼ガスの排気が行われることがある。これによって模型燃焼箱内の燃焼性状が変化することは十分に予想できる。ここで、この影響を給気方法によるものと排気方法によるものとに分けて検討してみる。

給気方法の影響を見るために、Fig. 7に給気量 80 l/min, トレイ 15 cm×15 cm, 排気方法を上方排気に固定して給気方法を上方給気, 中位給気, 中位拡散給気,

Fig. 7 Comparison of combustion gas (O_2 and CO) histories for experiments with different inlet conditions ($G=80$ l/min, tray size 15 cm×15 cm, upper outlet)

Fig. 8 Comparison of the theoretical air volume histories for experiments with different inlet conditions ($G=80$ l/min, tray size 15 cm×15 cm, upper outlet)

下方給気と変えた実験の排気ガス中の酸素濃度、一酸化炭素濃度の時間変化を比較して示す。また、実験で得た燃料重量減少速度にメタノール燃焼の化学量論比を乗じて、燃焼必要空気量を求めると Fig. 8 のようになる。給気方法ごとの燃焼性状の差が顕著になるのは、燃料の蒸発がピークを示す点火後 3~10 分以降である。

中位給気では燃焼が持続せず鎮火している。しかし、他の給気方法では燃焼が持続し、特に下方給気と中位拡散給気では一酸化炭素の発生が著しく、このときの燃焼必要空気量は給気量より大きな値になっている。一方、上方給気では一酸化炭素の顕著な発生が認められず、燃焼必要空気量は給気量よりわずかに小さい値をとりながら燃焼が持続している。

このように、同じ給気量でも、その位置や給気口の状況によって、燃焼性状に著しい違いが現れているのは、防火安全上の問題としても重要である。

中位給気では、点火後約 10 分で鎮火したが、Fig. 7 によれば、鎮火時の酸素濃度は、燃焼がより長く持続する下方給気, 中位拡散給気の場合の同じ時刻のそれとほ

とんど同じであり、酸素不足による消炎とは考えにくい。下方給気、中位拡散給気と比べると、この条件では、燃料の蒸発速度がわずかであり (Fig. 8), 燃料蒸発に必要な熱の供給源になるとされる天井の温度も 200~300 (K) 程度低くなっている。観察窓からの目視によると、この条件では、火炎は、トレイ上から排気口の方方向になびいており、他の場合ほど天井温度が上昇しないのは、火炎、プルームが垂直に上昇するのが妨げられるような気流が生じたためと考えられる。自由空間中の燃焼現象でも、このような気流が火炎を吹き消すことは多いから、このような気流は、消炎を引き起こす原因となった可能性も大きい。

上方給気では、燃焼は持続したが、Fig. 8 に示すように、燃料重量減少速度は下方給気、中位拡散給気に比べてかなり低い。上方給気でも、天井温度は下方給気、中位拡散給気より 200 (K) 程度低くなっており (Fig. 9), 中位給気の場合と同様に天井温度の上昇が妨げられることが燃料蒸発の抑制の原因であることは明らかであるが、観察によれば、この条件では火炎はトレイから鉛直

Fig. 9 Comparison of the ceiling temperature histories for experiments with different inlet conditions ($G=80$ l/min, tray size $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$, upper outlet)

Fig. 11 Comparison of the theoretical air volume histories for experiments with different outlet conditions ($G=80$ l/min, tray size $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$, middle inlet with baffle)

に上昇しているから、中位給気と同じ原因で天井が冷却されるとは考えにくい。この条件でなぜ天井が冷却されるかは十分明らかにできなかったが、室内のガスより著しく温度が低い空気を上方から給気すれば、室内の気流が乱れて安定な煙層の形成が阻まれるはずである。煙層が形成されなければ、室内の上部と下部の温度差が小さくなって、結果的に天井の温度上昇を妨げる。室内の気流の乱れは、給気の噴出速度が大きいほど、顕著になることが知られているから¹⁵⁾、給気位置の高さが同じならば、給気口に邪魔板を設けた場合より、噴流状に給気する方が、煙層の形成は妨げられやすくなるであろう。Fig. 9 によれば、天井温度は、下方給気、中位拡散給気、中位給気、上方給気の順に高くなっているが、この序列は、室内気流等に関する既往の知見から類推される煙層の安全性の序列と一致している。無論、本実験に用いた模型燃焼箱は、煙層の様相を観察するには小さ過ぎるので、より大規模な実験等により検証することが望ましい。しかし、燃料の蒸発を支配する重要な要因である天井温度は、室内気流の乱れによって、一応、矛盾なく説明す

Fig. 10 Comparison of combustion gas (O_2 and CO) histories for experiments with different outlet conditions ($G=80$ l/min, tray size $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$, middle inlet with baffle)

Fig. 12 Combustion gas (O_2 and CO) history for experiments with lower outlet ($G=80$ l/min, tray size $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$)

ることができることになる。

一方、排気方法による影響を見るために、Fig. 10 に、給気量 80 l/min, トレイ 15 cm×15 cm, 給気方法を中位拡散給気に固定して排気方法を上方排気, 中位排気, 下方排気と変えた実験の排気ガス中の酸素濃度, 一酸化炭素濃度の時間変化を比較して示す。また実験で得た燃料重量減少速度に、メタノール燃焼の化学量論比を乗じて、燃焼必要空気量を求めると Fig. 11 のようになる。Fig. 10 によれば酸素濃度の変化が上方排気, 中位排気と同様な傾向を示しているのに対して、下方排気では酸素濃度の減少が緩やかになっている。しかし、排気方法による燃焼性状への影響は、給気方法ほど顕著ではない。

排気方法による燃焼性状への影響で、特徴的なのは Fig. 4, Fig. 5 の図中に*, **印で示したものであり、 ϕ の値が 1 未満でも一酸化炭素の大量発生が認められ、しかも燃焼が持続するものがあった。この実験の換気方式は*印が下方給気, **印が中位拡散給気で、排気方法はいずれも下方排気であった。Fig. 12 にこれらの実験の排気ガス成分の時間変化を示す。排気ガス中の酸素濃度が点火後 2~3 分に 12~14 (vol %) に減少した後、点火後 30 分までの間で約 2 (vol %) 程度の減少しか示していないにもかかわらず、一酸化炭素が発生している。このように下方排気の場合に不完全燃焼が起こる原因としては、供給された新鮮空気は室内のガスに比べて著しく温度が低いために、床面近くから排気すると燃焼反応領域に至らずに排出される割合が多くなる可能性があることが挙げられる。さらに、下方排気では上方排気等の場合に比べて安定した煙層が形成されにくいと考えられ、その結果、火災面で起きている燃焼反応に酸素が足りない空気が用いられることが多くなると考えられる。これらの結果、供給された新鮮空気の酸素が十分でも燃焼領域周囲では酸素不足になったと考えられる。

5. まとめ

メタノールを燃料として用いた模型燃焼実験を行い、火災時にも強制換気される密閉空間の火災について、以下のことを実験的に明らかにした。

- ① 燃料蒸気の生成速度に対して換気量が不足する場合は、排気の一酸化炭素濃度が 4~5 (vol %) と、人命安全上、著しい脅威となり得る水準に達する可能性がある。
- ② 一酸化炭素の大量発生条件は、生成する燃料蒸気が完全燃焼するために必要な空気量と実際の給気量の比 ϕ にほぼ支配される。本実験では、おおむね $\phi \geq 1.0$ で一酸化炭素が大量発生した。
- ③ 強制換気される密閉空間の火災では、同じ給気量であっても、換気位置によって異なる燃焼性状を示す。給気については、燃料ガスの蒸発速度の大きさは下方給気, 中位拡散給気, 上方給気の順になっており、中位給気で

は実験の途中で消炎が起こっている。燃料蒸発速度の大きい下方給気, 中位拡散給気では、一酸化炭素大量発生が起こっている。しかし、排気位置は、下方排気における燃焼領域周囲での酸素不足領域の形成以外には、あまり燃焼性状に影響しない。

- ④ 火源の燃焼が十分持続する場合の燃料蒸発速度は、燃料表面への入射熱に支配される。

本実験では、小規模な模型を使用しているうえ、結果の分析の容易さを考慮して、液体燃料を火源とした点など、一般的な建物区画の火災とは異なる点が少なくなく、模型則を踏まえた上で実際の火災を再現するには十分であるとは言えない。しかし、上記の結果は、従来、研究の蓄積が少ない密閉空間火災の問題点の把握や性状の分析の指針としては意味があろう。上記④は、燃焼性状と一酸化炭素発生性状が火災室内の熱収支に影響されており、一酸化炭素の発生にかかわる防火安全性を予測・評価するにも、火災室の熱収支のモデル化が必要なことを意味している。一方、火災室内の熱収支は燃焼性状に依存しているから、一酸化炭素の生成を決定する条件である燃焼性状のモデル化と室内の熱収支構造のモデル化は、一方が他方を支配する形式ではなく、相互依存的な形式で定式化されるべきである。

付 記

本研究は、建設省建築研究所と大成建設（株）技術研究所の共同研究「無窓空間での燃焼現象の基礎研究」の一環として行ったものである。

本研究の実施にあたっては、建築研究所吉田正志氏に多大なる御指導、御助力頂いた。また、実験の実施にあたっては、元東京理科大学大学院野原聡哲、中林卓哉、元東京理科大学阿部 伸、中山史一、三木邦宏、伊藤享史、松本直純、東京理科大学大学院安井 昇の各君に御協力頂いた。さらに、研究の発案、実施について、大成建設鈴木邦臣氏に適切な御助言、御指導頂いた。ここに謝意を表します。

Terminology

- A_B : area of opening. (m^2)
- A_v : volatilizing area. (m^2)
- G : air supply rate. (l/min)
- H : height of opening. (m)
- H_v : heat of vaporization. ($kW \cdot s/kg$)
- M : air supply rate. (kg/s)
- m_v'' : fuel weight loss rate per unit area. ($kg/m^2 \cdot s$)
- T_c : ceiling temperature. (K)
- T_{ex} : exhaust gas temperature. (K)
- T_{out} : ambient temperature. (K)
- x : stoichiometric air to fuel ratio. ($= 6.48$ (g/g) for methanol.)

参考文献

- 1) 村上周三, 田中俊彦: 建物の気密性と酸欠・中毒・爆発事故について, 火災 Vol. 31, No. 3, pp. 7~17, 1986.
- 2) 大阪市消防局消防学校防災研究係: 気密性の高い耐火性住宅で自然鎮火した火災の再現実験結果について, 火災, Vol. 36, No. 2, pp. 37~42, 1986.
- 3) 鳥井四郎, 千葉 博, 武田松男, 新川光俊: 密閉空間の燃焼性状に関する研究, 日本火災学会研究発表会, 1986.
- 4) Kawagoe, K., Sekine, T.: Estimation of Fire Temperature-Time Curving in Rooms, Building Research Institute, Occasional Report, Vol. 11, 1963.
- 5) Magnusson, S. E., Thelandersson, S.: Temperature-Time Curve for the complete process of fire development, A theoretical study of wood fuel fires in enclosed space, Acta Polytechnica Scandinavica, Civil Engineering and Building Construction Series, No. 65, 1970.
- 6) Babrauskas, V., Williamson, R. B.: Post-flashover compartment Fires, Fire Research Group Report No. UBCFRG 75-1, University of California, Berkeley, 1975.
- 7) Backovsky, J., Foote, K. L., Alvares, N. J.: Temperature Profiles in Forced-Ventilation Enclosure Fires, 2nd International Symposium on Fire Safety Science, pp. 315~324, 1988.
- 8) Sugawa, O., Kawagoe, K., Oka, Y., Ogahara, I.: Burning Behavior in a Poorly-Ventilated Compartment Fire-Ghosting Fire-, Fire Science & Technology, Vol. 9, No. 2, pp. 5~14, 1989.
- 9) Gross, D., Robertson, A. F.: Experimental Fires in Enclosures, 10th Symposium (International) on Combustion, pp. 931~942, 1964.
- 10) Tewarson, A.: Fully Developed Enclosure Fires of Wood Cribs, 20th Symposium (international) on Combustion, pp. 1555~1566, 1984.
- 11) Beyler, C. L.: Major Species Production by Solid Fuels in a Two Layer Compartment Fire Environment, 1st International Symposium on Fire Safety Science, pp. 431~440, 1985.
- 12) 守川時生: 小規模室モデル内での高分子物質の燃焼による有毒ガスの発生特性, 消防研究所報告第 63 号, 1987.
- 13) Lomax, S., Simmons, S. J.: The Formation of Carbon Monoxide from Diffusion Flames, 1st International Symposium on Fire Safety Science, pp. 441~450, 1985.
- 14) Zukoski, E. E., Toner, S. J., Morehart, J. H., Kubota, T.: Combustion Processes in Two-Layered Configurations, 2nd International Symposium on Fire Safety Science, pp. 295~304, 1988.
- 15) 勝田高司, 村上周三, 小林信行: 閉鎖空間の気流性状に関する研究 (第 1 報空間中央の流れの性状), 日本建築学会論文報告集, 第 234 号, 1975.

(1991 年 6 月 10 日原稿受理, 1992 年 3 月 4 日採用決定)