

火災時に発生する燃焼生成ガスの毒性実験について

Experiment on the Toxicity of Fire Gases

清 水 栄 信*
 平 沢 正 己*
 古 河 大 直*
 栗 田 光 教**

In order to know the toxicity of fire gases, we made a model room(3600×2000×2400), and carried out some ad-hoc fire Experiments.

We could obtain the following facts.

- (1) In this room, a maximum of 0.73% Carbon monoxide produced by burning Cotton(1.800 g), Wool(160 g) and Hoam rubber(60 g). This fact caused the death of gas poisoning.
- (2) A maximum of 0.18% Carbon monoxide produced by burning a little Cotton(400 g) in the same way, and this concentration did harm to the human body.
- (3) In a comparatively large fire room, the complex toxicity was related to additive action of Carbon monoxide and Hydrogen Cyanide.

1. はじめに

近年、我々の生活空間に様々な材質の生活用品が取り入れられており、火災時に発生する燃焼生成ガスについては多元化が予想されているところである。従って、CO ガス及び他の毒性ガスと中毒との因果関係について解明が望まれている。

このような社会的背景から、当研究所においても燃焼生成ガスの毒性について研究を進めているところであるが、その一方策として昭和61年3月、都内で発生した死者を伴ったばや火災事例をとりあげ、実火災の状況を再現することにより、毒性ガスの発生状況を把握するとともに、実火災規模空間における複合ガスの毒性効果について実験を行い検討したので報告する。

2. 火災の概要

耐火造4/0住宅の4階居室から出火し、ベッド上の座布団、敷布団、掛け布団、シーツ、マットレス等が焼損した火災で、女性1人がCO中毒により死亡している。

出火原因は、寝タバコの火が枕がわりに使われていた座布団に着火し火災に至ったものである。

なお、この女性は外出先で飲酒しており、帰宅から約4時間後家族によって発見されている。

出火室の状況を図1に、また主な燃焼物の材質と量を表1に示す。

表1 燃焼物の量

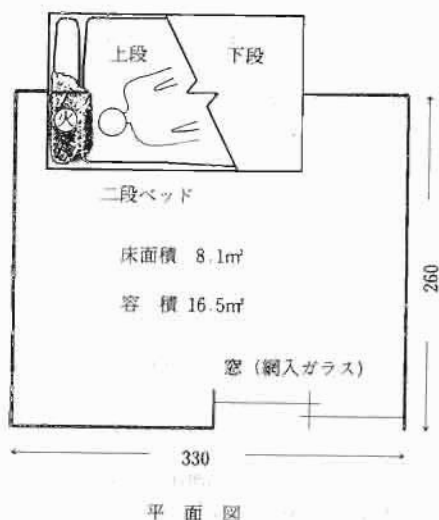
燃 焼 物	材 質	量 (g)
座 布 団	綿	1800 g
敷 布 団	羊 毛	160 g
マ ッ ト レ ス	ラバーフォーム (NR+SBR)	60 g
合 計	—	2020 g

3. 実験方法

本火災における死者発生原因を究明すべく再現火災実験を行い、また補足実験として表1に示す燃焼物を減少させ発生した毒性ガスにおける危険範囲の確認、及び動物実験による複合ガスの毒性効果について検討を加えた。

(1) 再現火災実験(以下「実験1」という)

鋼材及び珪酸カルシウム板により写真1に示すような出火室とほぼ同じ容積(17.3m³、4畳半規模)の模擬ハウスを作成し、模擬ベッド上(床から1.2mの高さ)に表1に示した燃焼物をタバコ(ロングピース、以下同じ)の火源により燃焼させ、表2に示す項目について測定を行



単位：センチメートル

図1 出火室の状況



写真1 模擬ハウスの状況



写真2 燃焼物の状況

表2 測定項目及び方法(実験1, 2)

測定項目	測定方法
ガス濃度	CO, CO ₂ , O ₂ は、ガス分析計により連続測定し、HCN等陰イオンガスは2wt%のNaOH液に吸収(1ℓ/minで5分毎)させ、高速液体クロマトグラフにより分析した。
煙濃度	光路長を50cmとした煙濃度計(CdSセル)により連続測定した。
燃焼速度	燃焼物重量を、変位変換器により連続測定した。
温度	プロコスデジタル記録計(CA熱電対)により5分毎に測定した。

った。(写真2, 3参照)

測定点は、部屋のベッド上、上層、中層、下層の4点とし、その詳細を図2-1にまたガス分析の流れを図2-2に示す。

なお模擬ハウスの換気回数は、0.4回/時間(鉄筋コンクリート造に該当)とした。

(2) 毒性危険範囲の確認実験(以下「実験2」という)



写真3 測定機器の状況

標準的な4畳半の居室において、最低どのくらいの量の可燃物が燃えれば生命に危険なガス濃度に至るのかを確認するため、表1の燃焼物の1/10量及び1/5量について実験1と同様に燃焼させ、ガス濃度について測定を行った。

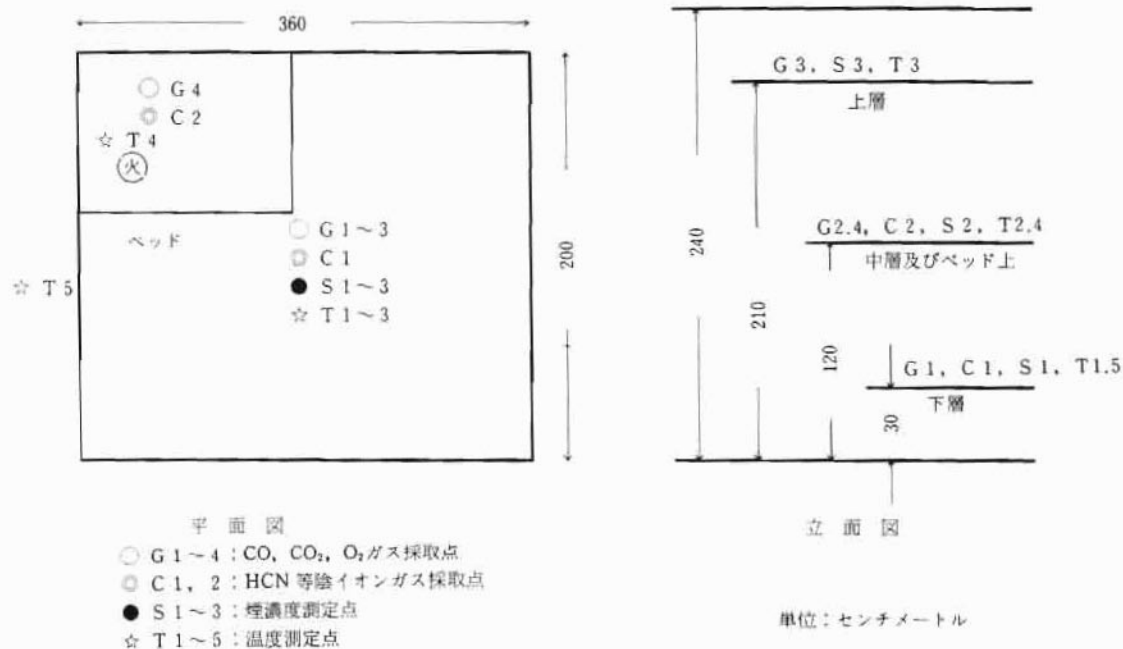


図 2 - 1 実験設備及び測定点 (実験 1, 2)

(3) 複合ガス毒性の確認実験 (以下「実験 3」という)

実験 1 において、燃焼生成ガスの分析結果より CO ガスの他に毒性の強い HCN ガスを検出したことから、特にこの 2 成分ガスに注目し、実火災規模空間における複合ガスの毒性について、マウスを用いた動物実験を行い、毒性の評価について検討した。

ア 供試体

綿 700 g に比較的 HCN ガスの発生し易いアクリル繊維を細かく刻み、100 g、200 g、300 g をそれぞれ均一に混合したもの及び綿 700 g、1,000 g をそれぞれ綿布地で枕状にするための 5 種類を供試体とした。(各供試体は前処理として 50°C の恒温槽で 24 時間以上乾燥した後、自然放冷した。)

イ 実験設備及び測定

実験空間を標準的な 6 畳間 (容積 23.3 m³, 換気回数 0.3 回/時間) とし、供試体を各々タバコの火源により燃焼させ表 3 の項目について測定を行った。(図 3 参照)

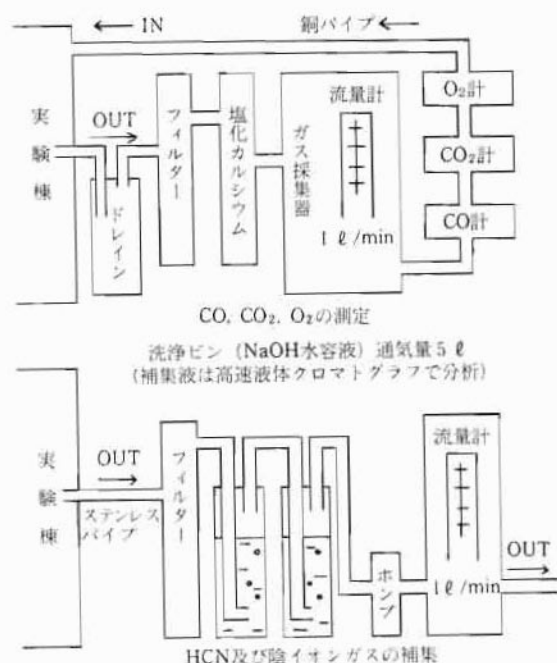


図 2 - 2 ガス分析の流れ図

表3 測定項目及び方法(実験3)

測定項目	測定方法
ガス濃度	CO, CO ₂ , O ₂ 及びHCN等陰イオンガスの測定については、実験1と同様に行い、測定点はマウスを配置した床上30cmの位置とした。
マウスの行動停止時間	床上30cmの位置に回転式マウスケージ8台を設置し、ガス有害性試験(昭和51年建設省告示第1231号)に基づくマウスを使用して、行動不能時間を求めた。
温度	実験1と同様の方法で行い、測定点はガス濃度測定位置と同じとした。

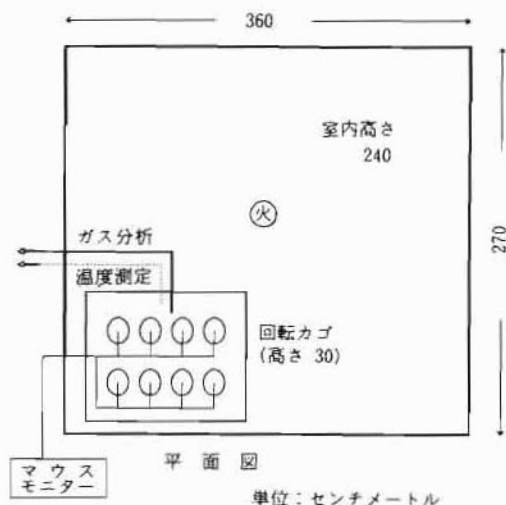


図3 実験設備(実験3)

4. 実験結果及び考察

(1) 実験1

ア 燃焼生成ガスの発生状況

部屋の各層におけるガス濃度変化を図4-1～5及び図5に示す。

焼死者のいたベッド上のガス濃度に注目すると、COガスについては人体に強い影響を与えられると思われる0.1%台(表4参照)に達するまで約50分を要し、濃度の増加も緩慢であったが、その後は60分で0.2%, 70分で0.3%, 75分では0.4%と急激な増加を示し、125分で最高濃度の0.78%を示した。

次に室内のCOガスの分布状況に注目すると、COガスが温度の高い燃焼生成ガスであること、またガス比重が空気より軽いことから当然予想されたことであるが、上, 中, 下層においてははっきりとした濃度の違いを示した。例えば上層と下層との比較において60分経過後の濃度は上層の0.23%に対し下層は

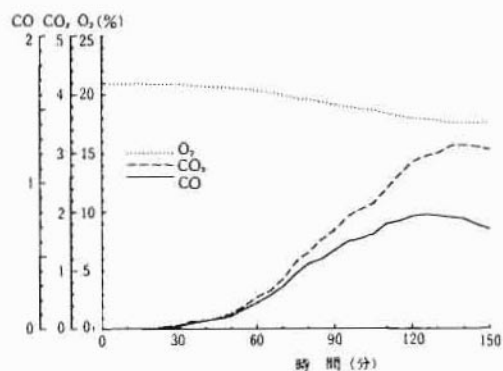


図4-1 CO, CO₂, O₂濃度変化(ベッド上)

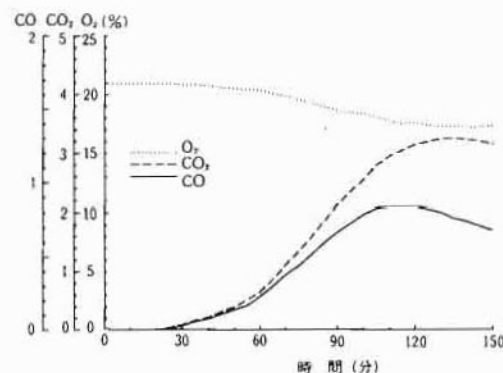


図4-2 CO, CO₂, O₂濃度変化(上層)

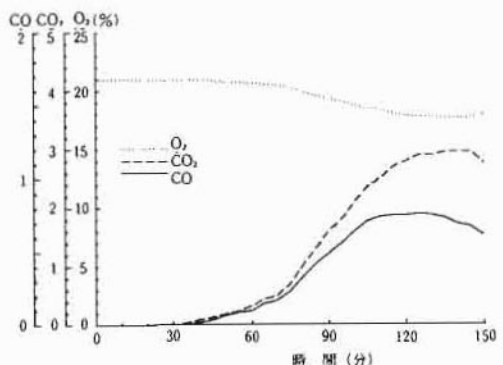


図4-3 CO, CO₂, O₂濃度変化(中層)

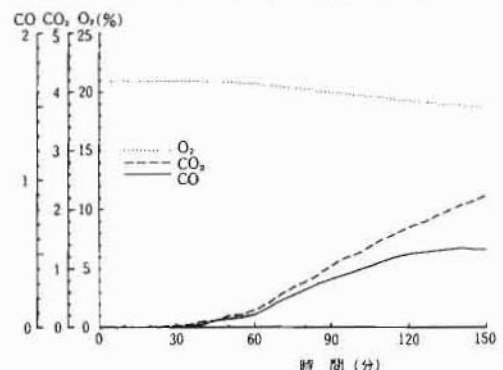


図4-4 CO, CO₂, O₂濃度変化(下層)

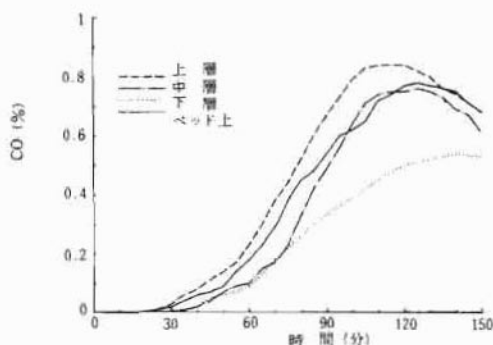


図4-5 CO濃度変化の比較

0.09%と2倍以上の違いを示し、そして0.1%に達するまでの時間の比較においても約20分の差を示した。

CO₂ガスについては、ベッド上において点火後約60分で公衆衛生上の許容濃度(0.5%)を超え、更に暫増し135分で最高値3.13%を示したが、この濃度では呼吸の深さが増すという症状は与えるものの、直接身体に影響する濃度ではなかった。

O₂ガスについては、点火後約120分過ぎから17%台に下がったが、それ以上の低下は示さなかった。これは主な燃焼物が綿であることから、無炎燃焼が継続し急激な燃焼状態には至らず、部屋の換気能力からO₂ガスの補充が行われたためと思われる。

HCNガスについては、点火後75分で7.4ppm、110分で7.2ppmと2つのピークを示しているが、文献値から推定した羊毛のHCNガス発生量の60ppm(160g燃焼)を遥かに下まわった。

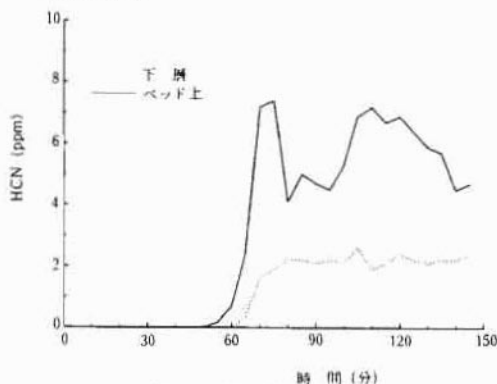


図5 HCN濃度変化

一般に、HCNガスは燃焼温度が高いほど発生し易いと言われているが、今回の実験で

は燃焼温度が比較的低温(最高温度で540°C)であったことがHCNガスの発生を抑制した1つの要因であると思われる。

なお、その他予想された陰イオンガスについては分析したところ検出されなかった。

表4 ガス濃度と身体に及ぼす影響
COガス濃度と症状

CO濃度(%)	症 状
0.03	1時間 頭重、頭痛
0.05	1時間 めまい、頭重、頭痛、顔面紅潮 CO-Hb 20% チアノーゼ、耳なり、不安感
0.07	1時間 頭痛著明、興奮、手足のしびれ感
0.10	1時間 CO-Hb 30% 呼吸促進、脈拍数増大、動悸、めまい、悪心嘔吐 2時間 CO-Hb 40%以上 激しい頭痛、興奮状態、手足麻痺 歩行不穩、感覚障害、精神混濁 3時間 CO-Hb 50~60% けいれん、虚脱、昏睡、チアノーゼ、呼吸停止、死
0.15	1時間 危険
0.20	30分 危険
0.30以上	30分 死

CO₂ガス濃度と症状

CO ₂ 濃度(%)	症 状
0.5	公衆衛生上の許容濃度
2.5	数時間の吸入で症状に変化なし
3.0	呼吸の深さが増す
4.0	粘膜に刺激、頭部圧迫感、血圧上昇、耳鳴
6.0	呼吸数が著明に増加
8.0	呼吸困難が著明
10.0	意識喪失、呼吸困難
20.0	生命に重要な中枢の完全マヒ、死亡

O₂ガス濃度と症状

酸素濃度(%)	症 状
16~12	脈拍、呼吸数の増加、精神集中に努力がいる こまかい筋肉作業がうまくいかない、頭痛
14~9	判断力がにぶる、発熱状態、不安定な精神状態、 刺傷などを感じない、酩酊状態、当時の記憶なし、体温上昇、チアノーゼ
10~6	意識不明、中枢神経障害、けいれん、チアノーゼ
10~6の持続またはそれ以下	昏睡→呼吸緩徐→呼吸停止→6~8分後心臓停止

HCNガス濃度と症状

HCN濃度(ppm)	症 状
13~36	数時間暴露でわずかに症状発見
45~54	即発的または遅発的影響なしに30分~1時間耐え得る
110~135	生命に対して危険、30分~1時間あるいはそれ以上で死
135	30分で死
181	10分で死
271	即死

イ その他の測定項目について

煙濃度、燃焼速度及び温度の測定結果を図6, 7, 8に示す。

煙の状況は、点火から120分ぐらいまでの間は部屋の高低差による煙濃度の差を示したが、その後均一化の傾向を示し、最終的には濃度の差はほとんど認められなかった。

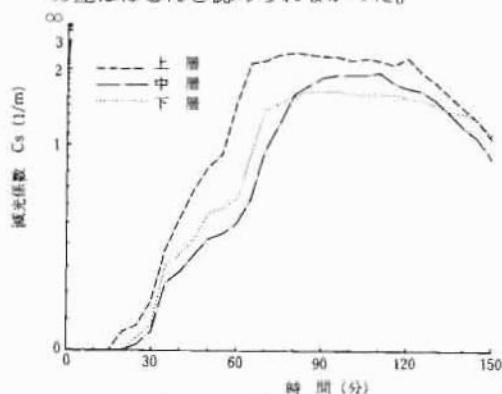


図6 煙濃度変化

初期の段階において、煙濃度は下層が中層より高かったが、これは上方に拡散した煙が壁面を伝わって下降し、対流していたためと思われる。

各層の煙濃度（減光係数 C_s ）の最高値は、下層1.62（見通し距離1.7m）、中層1.91（見通し距離1.4m）、上層2.44（見通し距離1.1m）であった。

燃焼速度は、点火後60分まではかなり緩やかであるが70分以降は急激に上昇し、燃焼速度20 g/min以上を示し、105分に最高の45 g/minを示したがその後、徐々に下降し140分に燃焼が終了した。

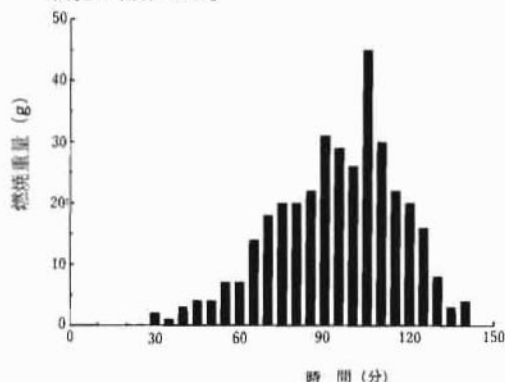


図7 燃焼速度変化

ここで、煙濃度と燃焼速度の変化を比較すると、ほぼ比例していることが認められた。

温度についても、部屋の上層にいくに従って高くなる傾向を示したが、上層の最高温度でも40.8°C（110分後）と比較的低く、中層、下層においてはほぼ常温であり、人体に影響するような温度には至らなかった。

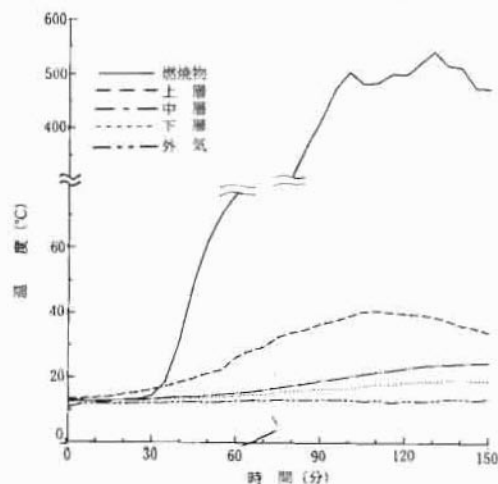


図8 温度変化

また、燃焼物自身の温度は最高540°Cまで上昇したが最後まで無炎燃焼が継続し、有炎燃焼には至らなかった。

(2) 実験2

部屋の各層におけるCOガス濃度変化を図9, 10に示す。

燃焼物量が2.020 gの1/10の場合、部屋の下層を除く各測定点において約60分で0.1%に達したがそれ以上の濃度上昇は見られなかった。

一方1/5の場合は部屋のどの測定点においても50分前後で0.1%を超え、70分にはベッド上で最高濃度0.18%を示した。

ここで、燃焼量が1/10の場合は換気の関係から0.1%（60分）の最高ピーク以降、徐々にCO濃度の低下を示しているが、暴露時間によっては身体に与える影響はかなりあると予想される。一方1/5の燃焼量の場合は、部屋の形状や換気量により一概には言えないものの、条件が揃った場合にはかなり危険な状況に至ることが確認された。

なおCOガス以外のガスについては、燃焼量1/10の場合、CO₂ガス濃度は0.4%（最高値）、O₂ガス濃度は20.4%（最低値）、HCNガス濃度は2.1ppm（最高値）、また燃焼量1/5の場合、CO₂ガス濃度は0.73%（最高値）、O₂ガス濃度は

19.9% (最低値), HCN ガス濃度は3.4ppm (最高値) という結果が得られたが, 人体に強い影響を与える濃度には至らなかった。

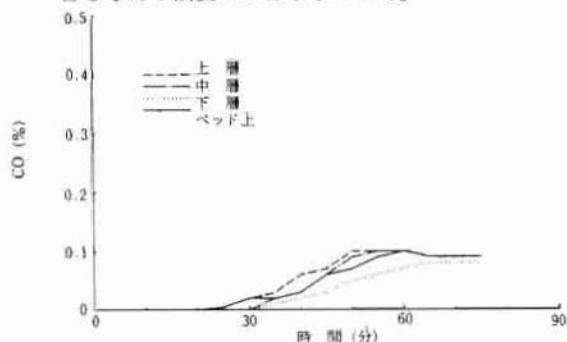


図9 CO濃度変化 (実験2 1/10量)

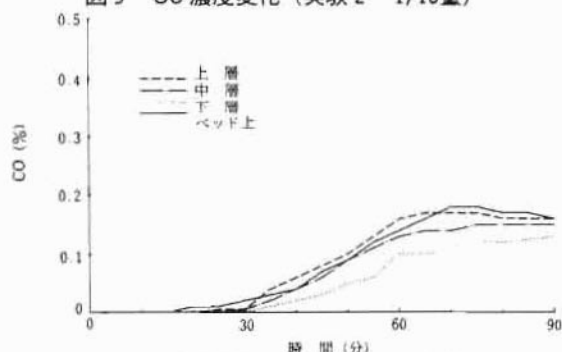


図10 CO濃度変化 (実験2 1/5量)

(3) 実験3

測定結果及びガス濃度変化を表5, 図11, 12に示す。

この実験においてマウスに影響を与える要因としてはCO, CO₂, O₂, HCN ガス, 温度及び煙などが考えられる。このうち単純性窒息性ガスであるCO₂ガス濃度は最高値で1.3%, O₂ガス濃度は最低値で19.2%といずれもマウスに直接影響を与える濃度に至っておらず, 温度についても最高値で21.7℃とほぼ常温であり, そして煙については一般的に煙自身の生理的要因は燃烧生成ガスの毒性より遥かに低いと言われており, また測定値にもあまり差がなかったことから上記の4要因については影響が微小であると検討要因から除外した。そして毒性が強く化学的窒息性ガスであるCO及びHCNガスがマウスに与える影響について実験データを基に検討してみた。

なお, 2種類程度の複合ガスの毒性については, 既に研究が進められており, 毒性の評価は行われているようであるが, これらはいずれも

高濃度, 短時間暴露という条件が多く, 当実験のような低濃度, 長時間暴露という条件下での適用が可能であるか否かを確認するため, それぞれの毒性をガス濃度と吸収時間の積で表わし, 以下のことについて検討した。

ア マウスの行動停止時間におけるCOガスとHCNガスの相加効果についての検討。

COガス及びHCNガスの毒性は一般に相加作用の関係にあると言われており総合毒性(Tox)は $Tox = \sum C_i / D_i$ (C_i : 各ガス成分の濃度, D_i : ガスの危険濃度) の式で表わされると言われている。

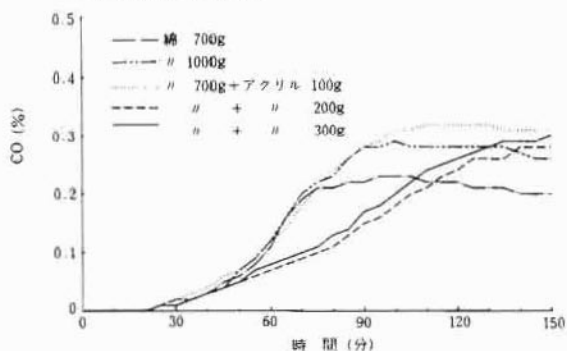


図11 CO濃度変化の比較 (実験3)

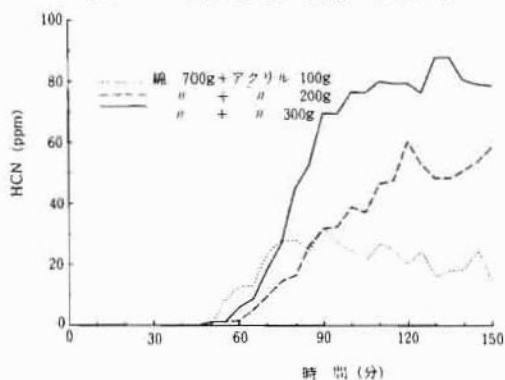


図12 HCN濃度変化の比較 (実験3)

この関係式を基に, COガスとHCNガスの間に次のような関係式を仮定してみた。

$$C_{CO} = \int_0^{t_1} \Delta C_{CO}(t) dt \quad \cdots \cdots (1)$$

$$C_{HCN} = \int_0^{t_1} \Delta C_{HCN}(t) dt \quad \cdots \cdots (2)$$

$$C_{CO} / D_{CO} + C_{HCN} / D_{HCN} = \alpha \quad \cdots \cdots (3)$$

t_1 : マウスの行動停止時間 (分)

C_{CO} : 行動停止に至るまでのCOガス濃度と吸収時間の積 (%・分)

C_{HCN} ：行動停止に至るまでのHCNガス濃度と吸収時間の積（％・分）

D_{CO} ：COガスの危険濃度時間（％・分）

D_{HCN} ：HCNガスの危険濃度時間（％・分）

α ：マウスが行動停止するまでの総合毒性（Tox）

そして(3)式に実験で得られたデータ C_{CO} 、 C_{HCN} 値（各々の平均値）を代入し、最小二乗法により $\alpha \cdot D_{\text{CO}}$ 、 $\alpha \cdot D_{\text{HCN}}$ をそれぞれ求めると次式が得られた。

$$C_{\text{CO}}/3.96 + C_{\text{HCN}}/9.34 \times 10^{-2} = 1$$

次にこの式における C_{CO} と C_{HCN} の相関係数を求めると -0.88 となりかなり高い相関が示されたことから実火災規模空間においてもマウスの行動停止時間におけるCOガスとHCNガスの毒性はほぼ相加的な関係にあると思われる。

なお $D_{\text{CO}}/D_{\text{HCN}}=42.4$ となり HCN ガスは CO ガスの約42倍の毒性の強さを示した。

イ 総合毒性（Tox）とマウスの死亡率との関係についての検討。

総合毒性と死亡率の相関については比例関係にあるとし、次のような式を仮定した。

$$X_{\text{CO}}/D_{\text{CO}} + Y_{\text{HCN}}/D_{\text{HCN}} = \beta \cdots (4)$$

$$Z = \gamma (\beta - \beta_0) \cdots \cdots \cdots (5)$$

そして(4)式において

X_{CO} ：一定時間（150分）COガスを吸収させた時の濃度との積（％・分）

Y_{HCN} ：一定時間（150分）HCNガスを吸収させた時の濃度との積（％・分）

D_{CO} ：COガスの危険濃度時間（％・分）

D_{HCN} ：HCNガスの危険濃度時間（％・分）

β ：一定時間（150分）までの総合毒性（Tox）

を示し、そして(5)式において Z は死亡率（ $0 \leq Z \leq 100$ ）、 β_0 はマウスが死に至るまでの安全毒性を示し γ を定数とする。

そして(4)および(5)式に実験で得られたデータ X_{CO} と Y_{HCN} を代入し、最小二乗法により γ/D_{CO} 、 γ/D_{HCN} および $\gamma \cdot \beta_0$ を求めると次式が得られた。

$$Z = 3.96X_{\text{CO}} + 172.0Y_{\text{HCN}} - 77.4$$

次に総合毒性（Tox）と死亡率 Z における相関係数を求めたところ 0.99 となり総合毒性と死亡率の関係においてもCOガスとHCNガスは相加的な作用をしていると思われる。そして得られた値から $D_{\text{CO}}/D_{\text{HCN}}=43.4$ と

表5 測定結果（実験3）

番号	供試体	室内のガス濃度				煙濃度 (1/m) max.	温度 max.℃	マウスの行動停止時間			死亡率 %	残査 g
		CO max. %	CO ₂ max. %	O ₂ min. %	HCN max. ppm			行動停止時間 min.	平均値 min.	標準偏差 σ		
1	綿 700 g	0.23	0.98	20.0	—	0.56	19.4	①73.5 ②81.6 ③71.3 ④72.1 ⑤73.6 ⑥70.8 ⑦70.0 ⑧80.8	74.2	4.2	0	50
2	綿 1000 g	0.28	1.31	19.2	—	0.58	19.3	①65.8 ②45.6 ③77.1★④64.8 ⑤60.0★⑥82.3 ⑦74.6 ⑧78.3	72.7	6.6	25	70
3	綿 700 g + アクリル 100 g	0.32	0.98	19.5	31.7	0.59	21.7	①67.9 ②72.7★ ③60.5★④76.4★ ⑤76.2★⑥64.6★ ⑦69.1 ⑧81.6	71.1	6.5	62.5	100
4	綿 700 g + アクリル 200 g	0.28	0.81	19.8	60.3	0.66	15.6	①72.7★②73.7★ ③79.7★④— ⑤80.8★⑥80.6 ⑦78.1 ⑧95.1	80.1	6.8	50	210
5	綿 700 g + アクリル 300 g	0.30	0.92	19.7	87.9	0.71	14.2	①75.2★②73.5★ ③74.8★④74.0★ ⑤69.1★⑥66.8★ ⑦89.5★⑧80.3★	75.4	6.5	100	220

※ マウスの行動停止時間は、試験開始からマウスが回転していることを示すパルスがなくなるまでの時間を測定した。なお、パルスが停止してから5分以上経過後のパルスはすでに行動不能状態とみなし削除した。

※ 行動停止時間欄の★印は、死亡したマウスを示す。なお、マウスの死亡は実験開始から150分後（実験終了時）に確認した。

※ 番号4欄の④のマウスは、実験途中マウスケージの故障により行動不能時間が測定できなかった。

なり CO ガスと HCN ガスの毒性の強さはア
における行動停止時間から求めた数値とほぼ
同じ値を示した。

5. ま と め

- (1) 実験 1 の結果、当火災事例においては出火から約 60 分で生命に危険な CO 濃度になり、その後数分で短時間致死の CO 濃度になったと推定され、直接の死因が CO による中毒であることが立証できた。

一方、CO₂、O₂ 及び HCN ガスの濃度は予想よりも低く直接身体への影響は少なかったものと思われる。

- (2) 実験 2 の結果、4 畳半という小さな部屋の場合は、わずか 400 g 程度の綿でも約 60 分で生命に危険な CO 濃度になり、部屋の換気量や位置によっては致死に至る可能性のあることが判明した。
- (3) 実験 3 の結果、実火災規模空間における CO ガス及び HCN ガスによる毒性が低濃度、長時間暴露によっても十分に相加的な作用を示すことが判明した。

6. お わ り に

今回の実験は、実火災規模空間において一貫して小火源による燃焼を想定してきており、この場合は様々な環境条件による影響が予想されるところであるが、特に燃焼物に注目すると、このような燃焼形態の場合は、燃焼速度の違いが身体に大きな影響を与えていることが判明した。

その一例として、実験 3 において綿 700 g + アクリル 100 g の方が、綿 700 g + アクリル 200 g よりもアクリルの含有量が少ない分だけ燃焼速度が早くなり、燃焼生成ガス濃度が早く上昇してマウスの行動停止時間及び死亡率に大きな影響を与えている。従って、火災の初期の段階においては、素材の違いによる燃焼速度の影響について今後検討する必要があると思われる。

最後に当実験において得られた結果及び上記のような問題点において更に検討を加え、今後も引き続きこのような火災事例について再現実験を行い燃焼生成ガスによる中毒死のメカニズムを解明していく予定である。

7. 参 考 文 献

- (1) 東京消防庁消防科学研究所：“火と煙有毒ガス” 東京法令出版
- (2) 英 一太 著：“プラスチックの難燃化” 日刊工業新聞社
- (3) 財団法人 日本防災協会：“火災における燃焼生成物の毒性に関する調査研究報告書” 1987 年 2 月