

燃焼排ガスによる室内空気の汚染について

木 内 孝 文*
山 形 真 司*

1. はじめに

耐火建物は木造建物に比べ一般に通気性は良くない。とくに冬期は、暖房効果を高めるために、開口部の密閉性はさらに高いものが要求される。

このような建物内で燃焼器具（以下火器と称する）を使用すると、建物内の空気中の O_2 が次第に減少し、不完全燃焼ガスが放出されてくる。

このようなことによる事故は、主として耐火構造のアパートやマンション、また営業上密閉して比較的強い暖房を必要とする喫茶店やクラブなどに集中しているのが現状である。そのほか、耐火建物内の煙突のないガス風呂による中毒事故も数多く報告されている。

そこで、生活安全課の協力を得て、これらに関する実験を行なったので、ここにその概要を報告する。

2. 実験目的

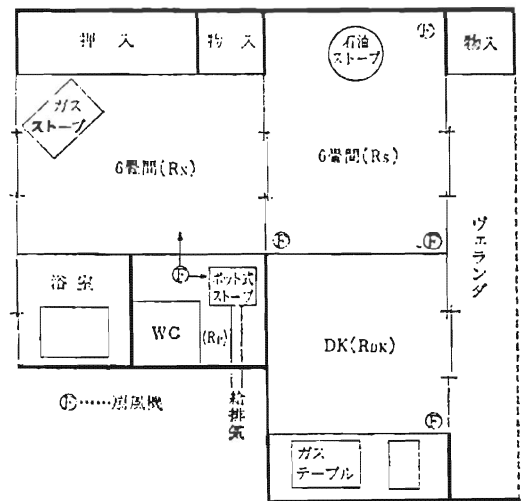
一酸化炭素中毒事故などが、実際にはどういうプロセスで発生するのかを実験によって確認し、その結果から事故防止の対策を究明する。

3. 実験内容と設定

実験室には、浴室とトイレを除く各部屋の仕切りを開放した全空間を用いた。火器は耐火建物のごく普通の使用状態を想定した設定をし、燃焼排ガスの発生状況を観察する。

火器は R_N (北側6畳) にガラストープ (2,350 Kcal/hr), R_S (南側6畳) には石油ストーブ (2,650 Kcal/hr), R_{DK} (台所) にはガス瞬間湯沸器 (8,300 Kcal/hr) と2口用ガスコンロ (2,450Kcal/hr×2) を各々設定した。その他、火器の燃焼停止後に、その時点の室温を保つため R_P (玄關) にポット式石油ストーブを設置した。このストーブの給排気は直接外部より行なった。これらの位置は図1に表わす。またガス

図 1



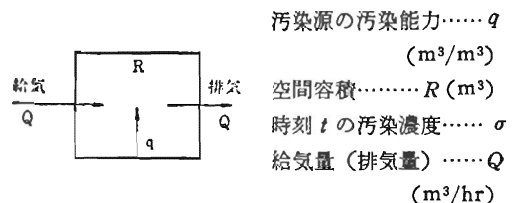
濃度測定のため、実験中は図1のように R_N, R_S, R_{DK} の各室に扇風機を設置し、全室のガス濃度の均一化を計った。

測定項目は「5. 実験結果」に述べる。

4. 室内の汚染現象の考え方

(1) 単一空間における汚染

内部に仕切りのないほぼ密閉された独立空間に汚染源 (たとえば CO_2 発生源) があって、時間とともに汚染濃度が高まって行く様子を考える。ただし、ここでは室内空気は十分に攪拌され、濃度は一樣とする。



今、微小時間 dt の間の濃度増分を $d\sigma$ とすれば、

* 第二研究室

この間のこの空間における汚染物質の収支は次のようになる。

$$Rd\sigma = qdt - \sigma Qdt \quad (1.1)$$

$$\therefore \frac{d\sigma}{\frac{q}{Q} - \sigma} = \frac{Q}{R} dt$$

積分して $t = 0$ のとき $\sigma = 0$ とおけば次式を得る

$$\sigma = \frac{q}{Q} \left(1 - e^{-\frac{Q}{R}t} \right) \quad (1.2)$$

$\frac{Q}{R}$ は給気量を室容積を単位として計ったもので、

換気回数 (n) と定義される。

十分時間が経った後では (定常濃度は)

$$\sigma = \frac{q}{Q} = \text{const} \quad (1.3)$$

となる。

(2) 汚染物質の発生がやんだ後の室内濃度

(1)のような発生が一定時間 t_0 だけ継続してやんだとする。

時刻 t_0 迄の室内汚染濃度は

$$\sigma = \frac{q}{Q} \left(1 - e^{-\frac{Q}{R}t} \right) \quad (0 \leq t) \quad (2.1)$$

時刻 t_0 以後は別に

$$\sigma = -\frac{q}{Q} \left(1 - e^{-\frac{Q}{R}(t-t_0)} \right) \quad (t_0 < t) \quad (2.2)$$

という汚染を考えれば

t_0 以後の室内濃度 σ は (2.1), (2.2) の合成であるから

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{q}{Q} \left(-e^{-\frac{Q}{R}t} + e^{-\frac{Q}{R}(t-t_0)} \right) \\ &= \frac{q}{Q} \left(-e^{-\frac{Q}{R}t_0} + 1 \right) e^{-\frac{Q}{R}(t-t_0)} \quad (t_0 < t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

ここで $\frac{q}{Q} \left(1 - e^{-\frac{Q}{R}t_0} \right)$ は q の発生が継続した場合の時刻 t_0 における室内濃度を表わしている。すなわち、汚染がやんだ後の濃度変化の観察を開始する時点の濃度である。これを σ_0 とすれば

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{Q}{R}(t-t_0)} \quad (t_0 < t) \quad (2.4)$$

計時を t_0 から始めることにすれば

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{Q}{R}t} \quad (t \geq 0)$$

これより

$$e^{\frac{Q}{R}t} = \frac{\sigma_0}{\sigma}$$

$$\therefore \frac{Q}{R} = \frac{1}{t} \ln \frac{\sigma_0}{\sigma} \quad (2.5)$$

として換気回数 n を知ることができる。

(3) 火器を使用しているときの室内 O_2 濃度

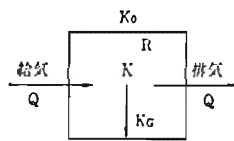
時刻 t における室内 O_2 濃度…… K

外気の O_2 濃度…… K_0

$t = 0$ における室内 O_2 濃度…… K_1

単位燃料当りの O_2 消費量…… k (m^3/m^3)

火器の燃料消費率…… G (m^3/hr)



今、微小時間 dt の間

の室内 O_2 濃度の増分を

dk として、室内における

O_2 の収支を考えれば

$$RdK = K_0 Q dt - kG dt - KQ dt \quad (3.1)$$

$$\text{変形して } \frac{dK}{K_0 - K - \frac{kG}{Q}} = \frac{Q}{R} dt$$

積分して、 $t = 0$ のとき $K = K_1$ とおけば

$$C = K_0 - K_1 - \frac{kG}{Q}$$

$$\therefore K = K_1 e^{-\frac{Q}{R}t} + \left(K_0 - \frac{kG}{Q} \right) \left(1 - e^{-\frac{Q}{R}t} \right) \quad (3.2)$$

を得る。従って十分時間が経った後の室内 O_2 濃度は

$$K = K_0 - \frac{kG}{Q}$$

となる。

(4) 火器を使用しているときの室内の CO 濃度

室内 CO 濃度…… C'

$t = 0$ の室内 CO 濃度

…… C'_1

外気の CO 濃度…… C_0

単位燃料当りの CO 発生

量…… m' (m^3/m^3)

K_0 における m' …… m'_1 (m^3/m^3)

単位燃料当りの O_2 消費量…… k (m^3/m^3)

CO と O_2 の関係を決める特性勾配 …… A

今、微小時間 dt 間の室内 CO 濃度の増分を dc'

として、室内における CO の収支を考えれば

$$Rdc' = C_0 Q dt + m' G dt - C' Q dt \quad (4.1)$$

$$\text{変形して } \frac{dc'}{dt} + \frac{Q}{R} C' - \frac{G}{R} m' - \frac{Q}{R} C_0 = 0 \quad (4.2)$$

ここで m' については、 O_2 濃度との関係において実験的に

$$m' = A(K - K_0) + m'_1 \quad (4.3)$$

と置きうる事が知られている。

ここに(3.2)で求めたKを用いれば

$$m' = A \left\{ K_1 e^{-\frac{Q}{R}t} + (K_0 - \frac{kG}{Q})(1 - e^{-\frac{Q}{R}t}) \right\} - AK_0 + m_1 \dots (4.4)$$

(4.2)のm'に(4.4)を用いれば

$$\frac{dc'}{dt} + \frac{Q}{R}C' - \frac{AG}{R} \left(K_1 - K_0 + \frac{kG}{Q} \right) e^{-\frac{Q}{R}t} + \frac{AkG^2}{RQ} - \frac{G}{R}m_1 - \frac{Q}{R}C_0 = 0 \dots (4.5)$$

(4.5)の解を

$$C' = ae^{-\frac{Q}{R}t} + \beta te^{-\frac{Q}{R}t} + \gamma \dots (4.6)$$

とすれば

$$\frac{dc'}{dt} + \frac{Q}{R}C' = \beta e^{-\frac{Q}{R}t} + \frac{Q}{R}\gamma$$

を得る。

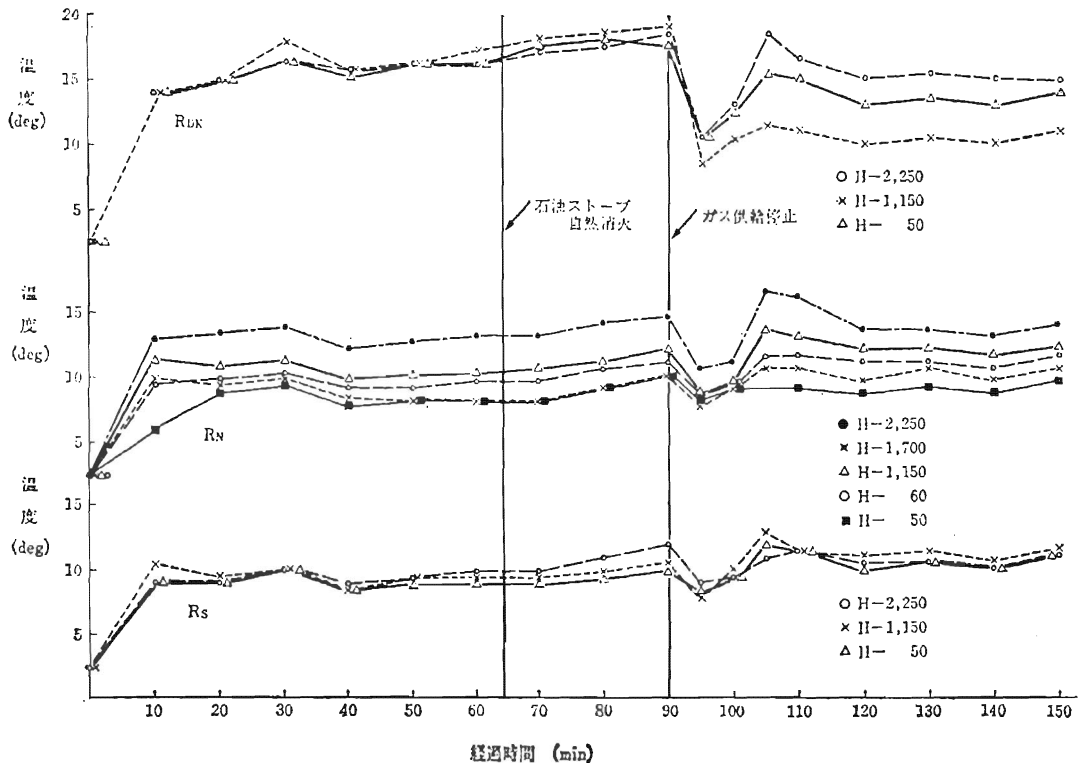
初期条件t=0でC'=Ciであるから

$$\alpha = C_i - \gamma \dots (4.7)$$

(4.7)を(4.6)に用いれば

$$C' = (C_i - \gamma)e^{-\frac{Q}{R}t} + \frac{AG}{R} \left(K_1 - K_0 + \frac{kG}{Q} \right) \times te^{-\frac{Q}{R}t} + \gamma = C_i e^{-\frac{Q}{R}t} + \frac{AG}{R} \left(K_1 - K_0 + \frac{kG}{Q} \right) te^{-\frac{Q}{R}t} + \left(C_0 + \frac{G}{Q}m_1 - \frac{AkG^2}{Q^2} \right) \left(1 - e^{-\frac{Q}{R}t} \right) \dots (4.8)$$

図 2



を得る。従って十分時間が経った後では

$$C' = C_0 + m_1 \left(\frac{G}{Q} \right) - Ak \left(\frac{G}{Q} \right)^2$$

となる。

5. 実験結果

(1) 室内温度

この実験における温度測定の目的は、各種ガス濃度の測定のために行なった室内空気の攪拌がうまくいっているかどうかを確認することにある。結果は図2の通りである。

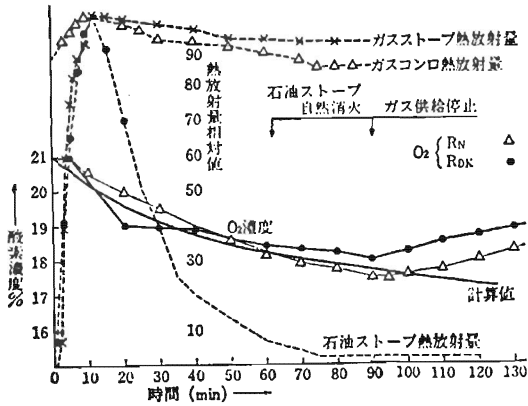
RDKおよびRsではほぼうまくいっている。RDKの後半実験の部分だけが不完全であるのは、後半の実験における室内の保温のために90分時点で点火したポット式石油ストーブの温風の大部分がRDKに入ったことによるものと思われる。温風の残りはRNに入りRsには直接入っていない。このことはそれぞれの平均的室内外温度差 ($\bar{T}_{DK} = 13.8 \text{ deg}$, $\bar{T}_N = 11.2 \text{ deg}$, $\bar{T}_S = 10.8 \text{ deg}$)からも推定することができる。

(2) 火器周辺の定点における温度および熱放射量

これらの測定の目的は、合せて室内O₂濃度の低下による火器の燃焼状態の変化を観察することにある。

これらの絶対値は定点のとり方で変り得るので、さして意味がない。従って図3の中央部の縦軸は、温度ないし熱放射量の相対値であって、正常燃焼時の値を100としたものである。

図3 O₂濃度と熱放射量



燃焼状態に関する情報としては、どちらから提供されるものも大した違いはないようであるが、方法としては室内空気の攪拌の影響を受けにくいことから熱放射量の方が優れているものと思われる。

図3は熱放射量とO₂濃度との関係を示すものであるが、一見してO₂濃度によるガス器具と石油器具との燃焼性の違いが明らかである。しかし、各器具のここに見られる燃焼性の低下については、それぞれの状態で放出されるCOガスの見地から述べられなければならない。このことについては後で述べる。

(3) 換気量(Q)

ア 換気回数(n)

この決定は前半実験の終了後、すなわち全ての火器の燃焼を停止した後に、室内の各種ガス濃度が旧の状態に復するところを利用して行なった。

R_{DK}, R_NのCO濃度変化と、R_{DK}のCO₂濃度変化および(2.5)を用いて算出した換気回数nの平均値は0.85、従って換気量Qは

$$Q = nR = 0.85 \times 80.1 = 68.1 (\text{m}^3)$$

表1 建物の換気回数

建物の種類	風速	室内外温度差	換気回数
鉄筋コンクリート造洋室	1m/s位の静かな日	5 deg 程度	0.3~1.0 回/h
木造・大壁造洋室	同上	同上	0.5~1.5 回/h
公営鉄筋アパート	v m/s	同上	1+0.75v 回/h

となる。

この測定を行なった時の室内外温度差の平均値は約12degで、風向は南、風速は平均2m/Sで実験棟の真上の屋上で測定したものである。

この実験では隙間の目張りを行なっているののでこの値は元の姿のものとは大部違っていると思われる。

参考文献によれば、換気回数は表1の通りであるから、n=0.85という値は見当として鉄筋コンクリートの洋室と考えればよい。

イ n=0.85の妥当性の評価

このことは、前述のように後半の燃料を消費していない状態で決定された値が、前半の実験における室内の各種ガス濃度の変化をどの程度矛盾なく説明できるかによって評価し得る。

(ア) 火器使用中の室内O₂濃度

この計算には(3.2)を用いる。必要な値は次のとおりである。

$$K_1 = K_0 = 0.21$$

$$R = 80.1 (\text{m}^3)$$

$$G = 3.1 (\text{m}^3/\text{hr}) \text{ (灯油の消費量は無視する)}$$

$$\frac{Q}{R} = n = 0.85$$

$$Q = 68.1 (\text{m}^3/\text{hr})$$

$$k = 0.96 (\text{m}^3/\text{m}^3) \text{ (理論空気量 } 4.58\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ より)}$$

従って(3.2)は

$$K = 0.166 + 0.044 e^{-0.85t}$$

この計算結果を図3に示した。実験値とはほぼ一致する。

(イ) 火器使用中の室内CO₂濃度

この計算には(1.2)を用いる。必要な値は次のとおりである。

$$Q = 68.1 (\text{m}^3/\text{hr})$$

$$q = 1.55 (\text{m}^3/\text{hr})$$

$$\begin{aligned} & \text{[単位燃料当たり CO}_2 \text{発生量} \times \text{単位時間} \\ & \text{間のガス消費量} \\ & = 0.5 (\text{m}^3/\text{m}^3) \times 3.1 (\text{m}^3/\text{hr}) \end{aligned}$$

$$n = 0.85$$

従って

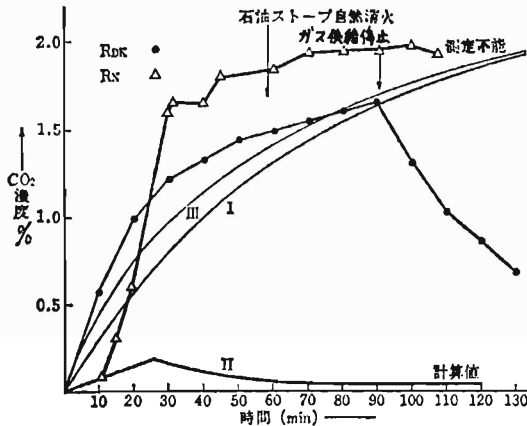
$$\sigma = 0.023 (1 - e^{-0.85t})$$

これをプロットしたのが図4の計算曲線Iである。

灯油の燃焼によるCO₂の発生は比較的大きいのでこれを考慮してみる。

この実験では石油ストーブ(白炎式対流型)は62分時点で消火して、この間の灯油消費

図 4 CO₂ 濃度



量は 110 g であり、その燃焼状態の変化は熱放射量曲線等に示される通りであるが、ここでは簡単に熱放射量曲線を見てその燃焼状態が 50% に落ちる 25 分時点までは正常燃焼を続け、以後完全に消えたと仮定すると、

$$q = 0.264 \text{ (kg/hr)} \times 1.54 \text{ (m}^3\text{/kg)}$$

であるから

$$\sigma' = 0.0061 (1 - e^{-0.85t})$$

となる。

この影響は $\frac{25}{60}$ 時間続いて止み、以後は (2.4) に従って旧に戻ると考える。

$$\sigma' \left(\frac{25}{60} \right) = 0.18 \text{ (}\%)$$

従って 25 分以後は

$$\sigma'' = 0.18 e^{-0.85 \left(t - \frac{25}{60} \right)}$$

となる。この値は計算曲線 II で示した。

室内 CO₂ 濃度は都市ガスと灯油による影響を合せたものである。これを曲線 III で示した。

このように灯油の燃焼による影響を考えると計算値が実測値により近づくので、30 分時点前後では灯油による汚染 (CO₂ による) 効果が大きかったことが推定され、このことと RN の攪拌があまりうまくいっていないという事実から、RN における CO₂ の実測値に示された妙な挙動は十分説明がつく。

以上、室内の O₂ および CO₂ 濃度変化の検討を通して、この実験室 (実験に用いた室。以後同じ) の換気回数 (n) が 0.85 であるとする妥当性は証明されたものとする。

なお十分時間が経った後の室内 O₂ および CO₂ 濃度はそれぞれ 16.6% と 2.3% となる。しかし、これは生命に危険な濃度とはいえない。

(4) 室内 CO 濃度

CO 濃度について実測結果を検討し、以後の推定を試みるためには、各火器の CO-O₂ の関係、いわゆる燃焼特性が正確に決定されている必要がある。しかし、同形式の火器であっても、その新旧、調整等によってこの関係が異なるのは明らかである。

ここでは入手した参考文献 (図 5) を用いて概略の推定を試みる。

まず図 5-3、および 5-4 にも図 5-1 および 5-2 のような直線的な関係を仮定する。これを図 5-5 において実線で表わした。そして、いずれ推定は概略であるから、更にガスコンロとガス瞬間湯沸器との間の平均的な関係を想定し、以後の検討ではこの点線の関係を用いるものとする。

ア 想定 I による影響

必要な値は次のとおりである。

$$A_1 = -0.152$$

$$C_1' = 0$$

$$K_1 = K_0$$

$$m_1' = 0.0012$$

(4.8) は

$$C' = \frac{AkG^2}{RQ} te^{-\frac{Q}{R}t} + \left(\frac{C}{Q} m_1' - \frac{AkG^2}{Q^2} \right)$$

$$\times (1 - e^{-\frac{Q}{R}t})$$

となるので、それぞれの値を代入すれば

$$C_1' = -257te^{-0.85t} + 357(1 - e^{-0.85t}) \text{ (ppm)}$$

この関係で支配されるのは、O₂ 濃度で 21% から 17.9% の間、時間で 1.5 時間 (90 分時点) でありこれ以後は想定 II で支配される。

90 分時点の室内 CO 濃度は 149ppm である。

イ 想定 II による影響

必要な値は次のとおりである。

$$A_1 = -4.792$$

$$K_1 = 0.179$$

$$K_0 = 0.21$$

$$m_2 = 0.006$$

$$C_1' = 1.49 \times 10^{-4}$$

(4.8) は

$$C_{II} = C_1'e^{-\frac{Q}{R}t} + \frac{A_{II}G}{R} \left(K_1 - K_0 + \frac{kG}{Q} \right)$$

$$\times te^{-\frac{Q}{R}t} + \left\{ \frac{G}{Q} m_2 - \frac{A_{II}kG^2}{Q^2} - \frac{A_{II}G}{Q} (K_1 - K_0) \right\}$$

$$\times (1 - e^{-\frac{Q}{R}t})$$

となるので、それぞれの値を代入すれば

$$C_{II}' = 149e^{-0.85t} + 3,044 (1 - e^{-0.85t})$$

$$- 2,356te^{-0.85t} \text{ (ppm)}$$

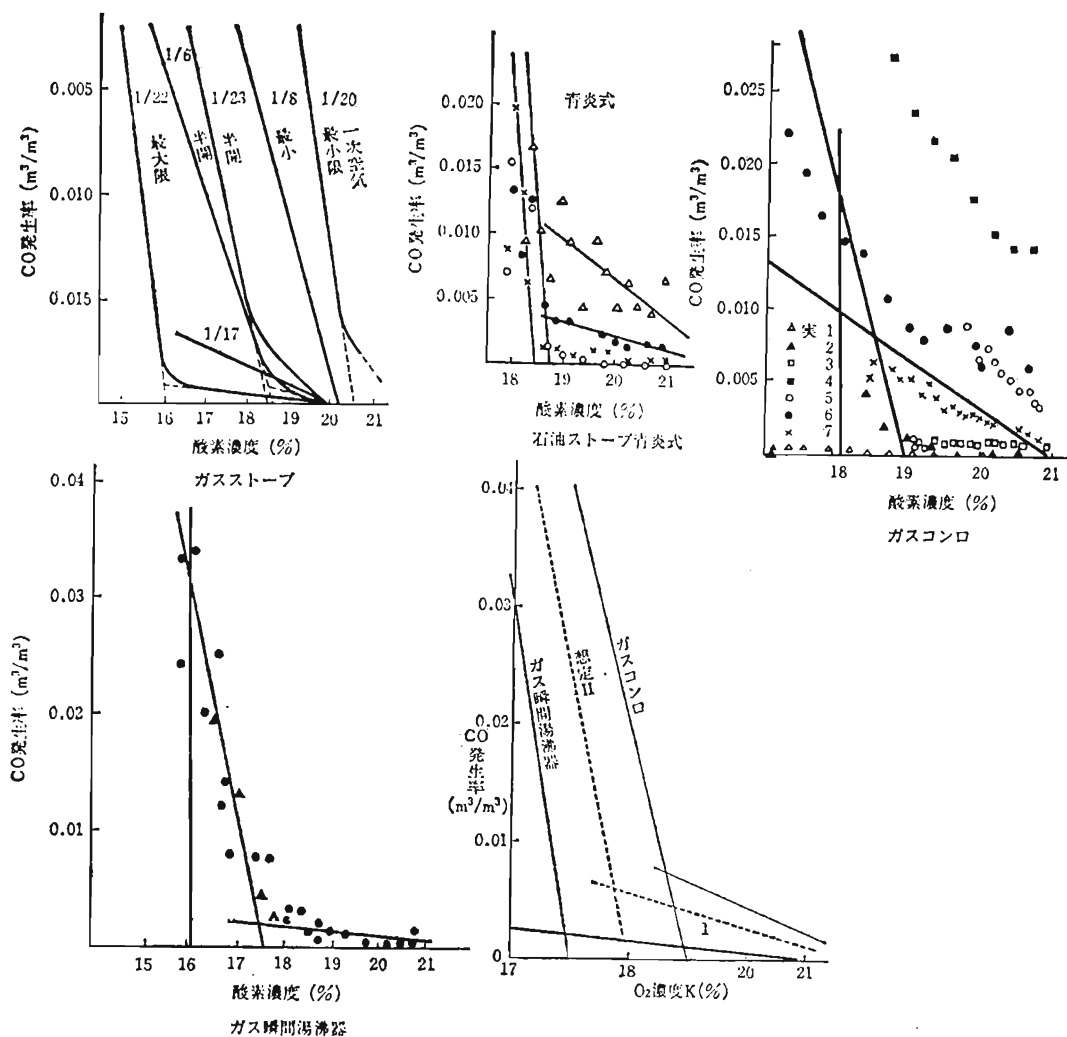


図 5 CO—O₂ 特性

左上より 5-1, 5-2, 5-3, 5-4, 5-5

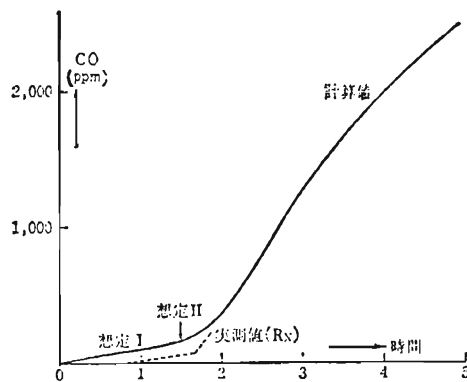
C_I' および C_{II}' の計算をプロットすれば図 6 に示すとおりとなる。

十分に時間が経った後の濃度は 0.3% に達するものと推定される。

実験に使用した部屋の CO 濃度の計算結果を要約すれば、実験 1 の CO の実測値は図 6 に示すようになるので、このことに関しては余り云々することはできないが、大体傾向としては同じであるものと思う。この点の一致の具合は、前述した想定のおき方によるものである。

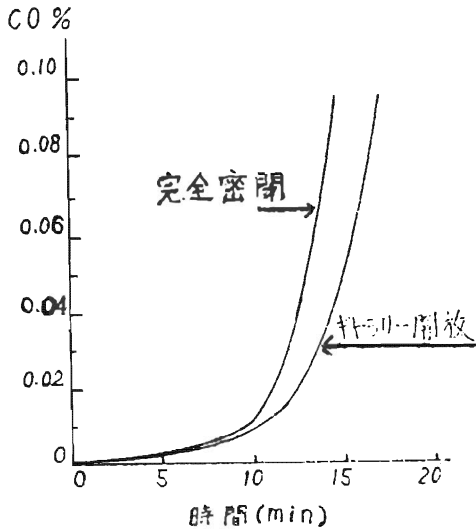
計算結果の妥当性は本実験と同時に進められた風呂場における実験 (図 7) の CO 濃度変化から証明される。すなわち、或る時点 (O₂ 濃度にして 18% 前後の時点) からの CO 濃度の急激な増大という点における両者の一致である。

図 6 CO 濃度



むしろ、個々の濃度変化の形状、すなわち立ち上り時間、立ち上りの勾配、および定常濃度など

図 7 風呂場における CO 濃度



は、室容積、換気量、火気器具の熱出力および燃焼特性によって大きく変わる。

6. ま と め

本実験の前に行なった予備実験の結果、実験に使用した部屋の換気量は、最近のアルミサッシを用いた建物と比較して明らかに大き過ぎることが判ったので、できるだけ現実に近い姿の実験とするために多少の目

張りを施して行なった。したがって、実験建物の本来の姿において発生する現象とは多少異っている。

本実験で計算された、この 2 DK 実験室の最終的な換気回数は 0.85 回/hr であったが、この値はアルミサッシ構造の耐火建物の値である 0.3~0.5 と比較してまだ大きい。

この室でごく普通的气コンロ (2 口)、ガス瞬間湯沸器、石油ストーブ、およびガスストーブを連続して使用したところ、1 時間で石油ストーブが自然に消え、その時点の O_2 濃度は 18.2% であった。そして、約 5 時間経過後の室内汚染の程度は O_2 16.6%、 CO_2 2.3%、CO 0.3% に達するものと推定された。

この室に人が最初から居住していたとすれば、CO 単独で考えても (酸欠等の複合効果を考えなくても) 約 3 時間前後で生命が危険となり、しかもその危険状態の発生は極めて急であることが判った。

これらの燃焼排ガス等による中毒事故を防止するには、現時点では室内の換気に留意する以外にない。

参 考 文 献

- (1) 建築気候 (斎藤平蔵)
- (2) 換気設計 (日本建築学会設計パンフレット)
- (3) 安全工学 (前沢正礼)
- (4) 気密気流から考察する酸欠住宅の安全対策

(吉沢 晋)