

住宅火災における一酸化炭素の危険性に関する考察

—くん焼時、初期拡大時および換気支配燃焼時の濃度レベルの予測—

Estimation of carbon monoxide levels in a room during smoldering, flaming growth and ventilation-limited stages of residential fires

末信 和也 (K110609)

Katsuya Suenobu (K110609)

1. 序論

1.1 研究の背景

火災報告^[1]によると、火災による死者に注目した場合、自殺や放火による死者を除いたとしても日本では1991年からの10年間に10,477人もの人が建物火災で亡くなっている。その中で住宅火災によって亡くなっている人は9,137人(87%)と非常に高い割合を占めている。

1.2 研究の目的

本研究では、住宅火災において人が亡くなる典型的なケースを割り出し、それらの火災になぜ人が逃げ遅れて死亡に至るのかという問題について、火災性状の面から掘り下げていこうとするものである。

1.3 分析方法

住宅火災における一酸化炭素の危険性を探るため、まず、統計データから、住宅火災において人が亡くなる典型的なケースの割り出しを行う。次に文献調査を行い、一酸化炭素の毒性、くん焼火災の仕組み、拡大火災の性状について十分な理解を得た上で住宅火災における一酸化炭素の危険性を検討するにふさわしい計算モデルを選定する。そのうえで実際の火災を反映した計算条件のもと予測計算を行い、住宅火災における一酸化炭素の危険性について考察する。

2. 住宅火災における死者発生経過の分析結果の概要

住宅火災によって死亡に至る経過を分析したところ、犠牲者が火災発生時にいた場所が死に至る経過に強く影響することが分かった(詳細は青山^[2]を参照)。

2.1 タバコによるくん焼火災の危険性について

出火室にいた人が亡くなるケースでは、火災発生時の発火源と着火物の組み合わせが死に至る経過に強く関係することが分かった。特に着目すべき点はタバコを発火源とする火災である。たばこを発火源とする火災は、布団等の着火物のくん焼から始まるのが明白で、それが拡大するまでにはかなりの時間がかかるはずである。十分な避難時間があると思われるにもかかわらず、逃げ遅れて死亡するには相応の理由があるはずである。

焼損面積1 m²以下の小規模の火災について、死因と死者発生経過を分析した結果によると、焼損面積

1 m²以下の小規模の死者は、タバコから寝具類、紙・ごみ類、繊維製品などに着火する火災で窒息/一酸化炭素中毒で死亡するケースと、コンロ、裸火、マッチ・ライター、ストーブなどから衣類に着火して火傷で死亡するケースに二分されることが分かった。この結果から、タバコ火災では、初期のくん焼火災のときに一酸化炭素中毒に陥る可能性が高いことが分かった。特に睡眠中のときに死亡する割合が高い。図1は、焼損面積によらずタバコを発火源とする火災死者の死因をすべての火災死者と比較したものであるが、タバコ火災では窒息/一酸化炭素中毒による死者の発生割合が特に高いことが分かる。

Causes of death in cigarette fires

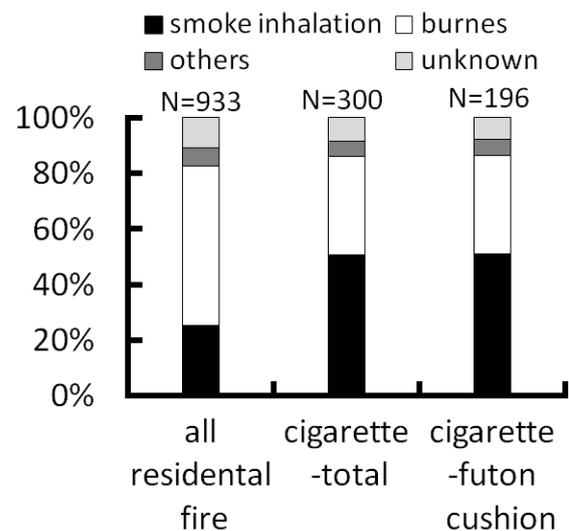


図1 タバコを発火源とする火災の死因の内訳

2.2 拡大火災の危険性について

出火室以外の場所にいた人が亡くなるケースでは、焼損面積1 m²以下の小規模火災で終わるケースは極めて少なく(約2%)、焼損面積が大きくなる場合が多いことが分かった。ただし、焼損面積が大きいかかわらず、火災室以外の場所にいた人の死因は6割が窒息/一酸化炭素中毒となっており、火傷により死亡する人の割合が相対的に低い。これは、出火室から離れた場所にいた人が、睡眠中などの理由で火災に気づくのが遅れ、火災ではなく煙により亡くなっている場合が多いことを示している。

出火室内において初期拡大中の発火火災では、酸素が十分にあるので、多量の一酸化炭素が発生する

ことはないが、燃焼が加速し、換気支配型の燃焼に移ると大量の一酸化炭素が発生することが分かっている。出火室以外の場所にいた人が亡くなるのは、火災室のフラッシュオーバーを起こして換気支配型の燃焼に移った後に発生した高濃度の一酸化炭素を含む煙により、避難路が汚染された結果とみることができる。

3. 文献調査結果

前節で述べたくん焼火災時に発生する一酸化炭素を予測するための手法、フラッシュオーバー以降に発生する一酸化炭素を予測するための手法、そしてこれらの火災で発生する一酸化炭素の毒性について詳しく知るため、文献調査を行った。

3.1 くん焼火災時に発生する一酸化炭素の予測手法について

くん焼火災の危険性については、Quintiere^[3]が米国で多発しているソファのくん焼火災の危険性について検討した結果を報告している。この論文はソファのくん焼で発生する一酸化炭素の発生量をゾーンモデルに入力して、室内に形成される煙層と煙層内の一酸化炭素濃度の時間変化を予測し、さらに人体に蓄積される一酸化炭素ヘモグロビン(CO_{Hb})濃度と関連のある一酸化炭素暴露値を予測して、くん焼火災の危険性を明らかにしたものである。

ゾーンモデルの入力値として重要なのは、火源の燃焼速度(重量減少速度)と燃焼物の単位重量当たりに発生する一酸化炭素の割合を示す一酸化炭素(CO)イールドである。Quintiere の研究成果を日本の住宅火災に応用するためには、日本の住宅火災で特有な燃焼物の燃焼速度と(CO)イールド値を知る必要がある。この目的のため、国内では万本ら^[4]が実験的な研究を行っている。万本らの研究は住宅用火災警報器の効果を検証するために行ったもので、住宅の初期火災の典型パターンを実験的に再現し、その結果を予測に用いるため、各種燃焼物に対して、燃焼速度の時間変化のデータと、燃焼中の煙および一酸化炭素イールドの平均値を提供している。万本らの実験結果によれば、混紡製品に比べ綿100%の布団が最も速くくん焼し、燃焼重量の約11%に相当する一酸化炭素が発生することが分かった。

3.2 初期拡大時および換気支配燃焼時に発生する一酸化炭素の予測手法について

初期拡大時および換気支配燃焼時に発生する一酸化炭素をゾーンモデルにより予測する試みはToner^[5]、Morehart^[6]、Beyler^[7]らによって開始された。彼らが提案したモデルはGER Model(Global Equivalence Ratio Model)と呼ばれるもので、初期拡大時および換気支配時に室内に形成される煙層を、フードを用いた実験モデルにより再現し、火源の重量減少速度と煙層内の一酸化炭素濃度を測定し、酸素供給量の指標であるEquivalence Ratioと関連付けて整理したものである。彼らの研究成果の重要な点は、初期拡大時および換気支配燃焼時に発生する一酸化

炭素のイールド値が燃焼材によらず、Equivalence Ratioだけの関数になるというもので、区画火災により発生する一酸化炭素を予測するための手法として画期的なものであった。

Toner, Morehart, Beylerらの測定結果は、その後、Gottuk^[8]による模型を用いて行われた区画火災の実験結果により書き換えられるが、GERモデルの有用性についての評価は変わらず、適用範囲を明らかにした上で、Gottuk and Lattimer^[9]によりエンジニアリングモデルが提案されている。

Pitts^[10]は、Gottukと同時期にGERモデルの適用性について、既往の研究と自身の実験結果を整理し、GERモデルが決して万能ではなく、実際の区画火災で観測される一酸化炭素濃度の下限値が予測できるだけで、実大環境で起きる換気支配火災では、多くの場合GERモデルの予測値よりも高い一酸化炭素濃度が観測されることを示すとともに、GERモデルが適用できる条件と適用できない例を示した。日本のBRI-2002(Tanaka^[11])には一酸化炭素濃度を予測するための計算モデルが含まれるが、これはBeyler^[7]の実験結果を反映させたGERモデルである。

国内では、換気条件と関連付けて一酸化炭素の濃度を測定した例は少ないが、最近、若月^[12]が、内容物を含めて実際の居室火災を再現し、初期拡大時およびフラッシュオーバー以降の一酸化炭素濃度の測定結果を報告している。再現したのは、6畳の居室でこたつやストーブを初期火源とする火災で、着火から5分程度の短時間にフラッシュオーバーが発生することと、それ以降の室内(煙層中)の一酸化炭素濃度が数%に達することが示された。

3.3 火災時に発生するガスの毒性について

一酸化炭素を含む空気を呼吸したときの人体への影響については、生体的な観点で血中の一酸化炭素ヘモグロビン(CO_{Hb})濃度を予測する手法が報告されている^[13]。そのうち火災時に発生する有毒ガスを評価する手法としては、人体が暴露される一酸化炭素濃度値(ppmまたは%)を時間積分して計算される(式(1))暴露量(D_{CO})を、許容限界値(C_t)と比較する方法が一般的である。その許容限界値は3.5%・minで、それを超えた場合((CO_{Hb})濃度30%~40%に相当)激しい頭痛、悪心、嘔吐、運動能力の喪失などの症状を呈するとされる。

$$D_{CO} = \int_0^t C_{CO} dt \quad (1)$$

4. 火災発生時の一酸化炭素による危険度の評価

4.1 布団のくん焼火災時における一酸化炭素濃度の時間変化の予測

図2の要素からなる単室モデルを作成し、ゾーンモデルによって検証した。万本らの論文のグラフ^[4]を外挿して重量減少曲線を求め、重量減少率(m_f)に燃焼熱(ΔH)を掛け合わせて発熱速度変化(Q_f)を(式(2))、(CO)イールド値(Y_{CO})を掛け合わせて一酸化炭素発

生率(m_{co})をそれぞれ求め(式(3))、それらをゾーンモデルに入力して一酸化炭素を含む煙層がどの程度の時間で床面付近に達するか、煙層中の一酸化炭素濃度がどのように変化するか予測計算を行った。

$$\dot{Q}_f = \Delta H \cdot \dot{m}_f \quad (2)$$

$$m_{co} = Y_{co} \cdot \dot{m}_f \quad (3)$$

計算条件は、万本らの実験に合わせて図3のように設定した。六畳間に相当する床面積 10.0 m^2 、天井高 2.4 m の室内で火源の綿布団が燦焼を開始し、その後発炎燃焼に至ることなく120分間くん焼を続けることを想定した。

計算結果を以下に示す。図4は煙層内の一酸化炭素濃度の時間変化である。煙層は燦焼開始後10分程度で寝ている人の頭部に達し、20分程度の比較的早い時間に床面付近に達する。このときの一酸化炭素濃度は 0.007% (70 ppm)で、人体に大きな影響を及ぼす程度の濃度ではない。その後、一酸化炭素濃度は徐々に増加し、60分経過時には 0.17% (1700 ppm)となる。それ以降も、一酸化炭素濃度はほぼ直線的に増加し、120分経過時には約 0.9% (9000 ppm)に達する。

図5は火災発生に気づかず人が寝ていることを想定し、煙層が寝ている人の頭部に達した後、その人が曝されるCO-doseの変化量を示したものである。

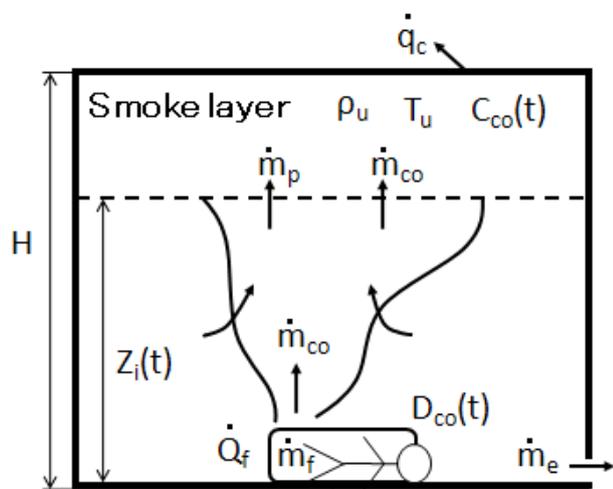


図2 くん焼時、計算モデルの模式図

煙層が床面付近に達した後、一酸化炭素濃度は単調に増加するため、CO-doseは急激に増大し、64分経過時に許容限界値の 3.5% -minを超える。これは、(COHb)濃度が約30%に上昇することに相当し、すなわち体内の血液の30%を失うことを意味する。そのため、就寝時にくん焼火災が発生した場合、気づく前に自力避難不可能な状態に陥ってしまうことが考えられる。

4.2 拡大火災時に予測される一酸化炭素濃度の予測

くん焼火災と同様に、図6の要素からなる単室モデルを作成し、ゾーンモデルによって検証した。発熱速度(Q_f)はフラッシュオーバーが発生するまでは αt^2 の火災成長率に基づいて成長し、フラッシュオーバー後の発熱量は一律で 1100 kW とする(式(4))。その後の Equivalence Ratio (Φ)は 1.0 、(CO)イールドは徐々に増加して60秒後に 0.2 g/g の一定値になるとして計算を行う。

$$\dot{Q}_f = \begin{cases} \alpha t^2 & [\text{kW}] (t < t_{FO}) \\ 1100 & [\text{kW}] (t \geq t_{FO}) \end{cases} \quad (4)$$

計算条件は、若月^[12]らの実験に合わせて図7のように設定した。フラッシュオーバーに必要な熱量は 670 kW 、フラッシュオーバーが起きる時間を366秒後として計算を行った。

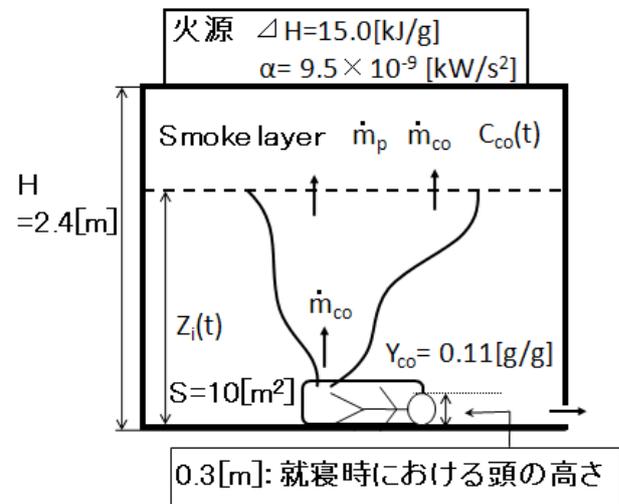


図3 くん焼時の計算条件

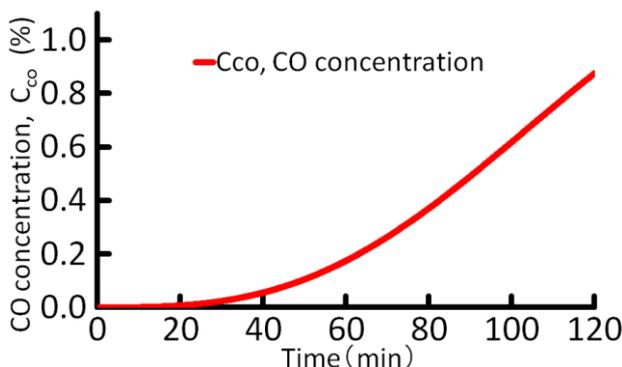


図4 くん焼時、煙層中の一酸化炭素濃度変化

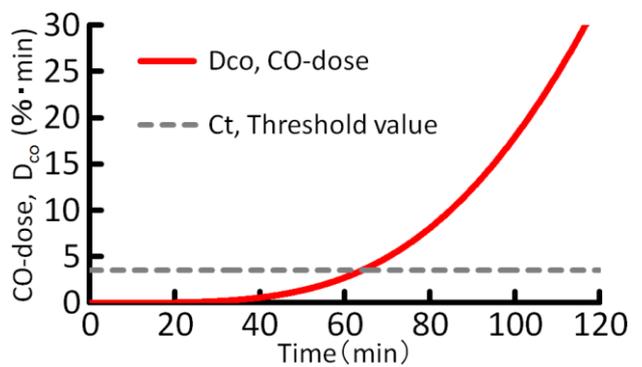


図5 くん焼時、一酸化炭素暴露量の時間変化

