

修 士 論 文

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

国際火災科学研究科

火災科学専攻 K110609 末信和也

指導教員 博士(工学) 山内幸雄

<目次>

第1章序論.....	1
1.1. 研究の背景.....	1
1.2. 研究の目的.....	4
1.3. 分析方法.....	4
1.4. 論文の構成.....	5
第2章住宅火災における死者発生経過の分析結果の概要.....	6
2.1. 火災発生時に犠牲者が火災室にいた場合.....	7
2.2. 火災発生時に犠牲者が火災室以外の場所にいた場合.....	13
第3章文献調査結果.....	17
3.1. くん焼火災の性状について.....	17
3.2. 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.....	20
3.3. 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.....	24
3.4. 火災時に発生するガスの毒性について.....	33
第4章火災発生時の一酸化炭素による危険度の評価.....	35
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.....	35
4.2. フラッシュオーバー発生時に予想される一酸化炭素濃度の予測.....	42
第5章考察.....	47
5.1. くん焼火災の危険性について.....	47
5.2. フラッシュオーバー火災の危険性について.....	47
第6章総括.....	48
参考.....	49

第 1 章序論

1.1. 研究の背景

住宅火災による被害

火災による死者に注目した場合、住宅火災は多くの被害を出している。例えば総務省消防庁の火災報告^[1]のデータによると、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2000年までの10年間に10,477人もの人が建物火災で亡くなっているが、その内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。経年で見たととしてもその割合は一貫して高く、住宅火災への対策が重要であるといえることができる。

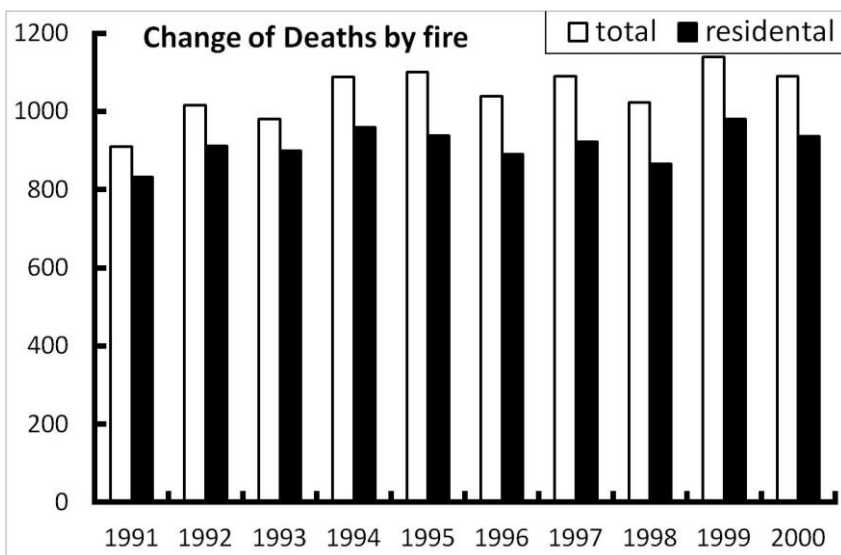


図 1 火災死者数の内訳

また、住宅火災による被害者として死者数（放火自殺者などを除く）の割合に注目した場合、消防白書^[22]（平成23年度）によると、65歳以上の高齢者の割合は3年連続で6割を超えている。高齢社会白書^[23]（平成23年度）より、平成22年時点での高齢者の割合は23%を超え、今後総人口が減少する中で「団塊の世代」（昭和22年～昭和24年）が65歳以上になる平成27年には26.9%、その後も増加し続けると予想され、住宅火災による被害も今後さらに増大していくことが予想される。そのため、住宅火災における高齢者への早急な対策が必要とされている。

住宅用火災警報器

そういった中、消防法改正（平成16年）により、既存住宅を含めた全ての住宅を対象として住宅用火災警報器の設置が義務付けられ、各市町村の条例に基づき、平成23年6月までに全国全ての市町村において施行された。それに合わせて全国の消防本部等において、既存住宅を含めたすべての住宅に向けて住宅用火災警報器の設置が強力に推進された。消防白書^[22]（平成23年度）によると、平成23年6月1日時点での住宅用火災警報器の推計設置率は全国で約71.1%となっており、平成22年6月1日時点での推計設置率（58.4%）から12.7%上昇となっている。米国では^[21]、1970年代後半から火災による死者数が5,000人を超えたことを契機に、個人の住居に住宅用火災警報器を設置させることが国家的方針となり、州法等で住宅用火災警報器の義務付けが行われ、1997年には50州中41州で義務付けが行われた。住宅用火災警報器の設置率は、1977年には2割程度であったが1990年代には9割を超え、それにもなって住宅火災による死者数は1977年の6,000人程度から1990年代後半には3,000人程度に半減した。

住宅火災における一酸化炭素中毒による死者発生シナリオ

住宅火災における一酸化炭素の危険性を知るため、本研究では青山^[2]による統計データの分析結果を参考にしている。青山の研究結果において、統計データを分析した結果、死者発生原因(死因)には火傷による死者と窒息/一酸化炭素中毒の二つに大別され、その割合は全体的に見てそれぞれほぼ半数であることが分かった。

火災発生時に犠牲者がいた場所と火災原因、死因と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火災室であった場合には、火災発生のパターン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、タバコを発火源とする火災は必ずくん焼から始まり、ある程度の時間を経てから着炎に至るので、十分な避難時間があるにもかかわらず、火災がごく小規模に終わっても、逃げ遅れて死亡するケースが多くあることが分かった。

一方、火災発生時に火災室以外の場所にいた人が亡くなるケースでは、火災発生の原因にかかわらず焼損面積が大きくなる場合が多いが、死因については、窒息/一酸化炭素中毒の割合が約60%と高いことが分かった。これは、火災室から離れた場所にいた人が、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。

これらのケースは、いわゆる煙に巻かれて死亡するシナリオの典型的な例であると考えられる。つまり、住宅火災における一酸化炭素中毒による被害は、主にこれらのケースにおいて起きているとして研究の方向性を定めた。

1.2. 研究の目的

住宅火災における一酸化炭素中毒の可能性が疑われるシナリオ。

- ① 出火時、出火室にいる人が亡くなるケースで、たばこを発火源とし、寝具、紙ゴミ類を着火物とする火災。火災初期に長時間のくん焼が疑われる火災。就寝時に火災が発生し、火災が覚知される前に一酸化炭素の毒性によって避難能力を失い、十分な避難時間があるにもかかわらず一酸化炭素中毒によって亡くなってしまう。
- ② 出火時、出火室以外にいた人が亡くなるケースで、特に焼損面積の大きい火災。火災の覚知が遅れ、火災が拡大した際に発生した多量の煙によって逃げ場を失う。その後、炎によって焼かれるか、煙に巻かれて、煙に含まれる一酸化炭素などのガスの毒性によって亡くなってしまう。

上記2点のケースにおいて、火災室で発生する一酸化炭素の濃度を予測することで、住宅火災における一酸化炭素の危険性に関する考察を行う。

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、

1. 青山^[2]の統計データから、住宅火災において、一酸化炭素中毒によって人が亡くなっていると思われるケースの割り出しを行う。
2. それらのケースになぜ逃げ遅れて死亡に至るのかという問題について文献調査を行い、一酸化炭素の毒性、くん焼火災の仕組み、拡大火災の性状など住宅火災の一酸化炭素の危険性に関する研究を調べる。
3. それら既存の研究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。
4. 既存の実験結果などを元に、実際の火災の条件を反映した計算条件を設定する。
5. その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。

1.4.論文の構成

2章

総務省消防庁の火災報告^[1]のデータを用いた分析結果を元に、住宅火災において一酸化炭素による被害と思われるケースの割り出しと、一酸化炭素中毒が疑われるとする根拠を挙げる。

その死因が一酸化炭素であるかどうかには注意しつつ、発火源、着火物、出火場所、出火時刻、避難能力等データの分析を行い、そこに現れた特徴をもってしてその根拠を挙げる。

3章

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。

くん焼火災、初期拡大および換気支配燃焼時における一酸化炭素発生量に関する研究を参照することで計算モデルを検討し、日本における住宅火災の実態を調査する研究を参考に、予測計算にふさわしい計算条件の選定を行う。

4章では

実際の火災を反映した計算条件のもと予測計算を行い、一般的な住宅火災における一酸化炭素の濃度レベルと、許容限界値を超えるのに有した時間などから、実火災における一酸化炭素の危険性を検討する。

第2章住宅火災における死者発生経過の分析結果の概要

はじめに

一酸化炭素の危険性を調べる上で、住宅火災において人が亡くなるのはどういったケースなのか、特に一酸化炭素が原因で亡くなる場合について、その典型的なケースの割り出しを行う必要がある。本研究では、その典型例の割り出しに総務省消防庁の「火災報告」^[1]のデータを用いた。この報告は、日本で発生した火災のうち、消防に連絡がきたもの全てを対象としてその時刻、火源情報、被害などを記録したものである。

第2章では「火災報告」の統計データから、住宅火災の死亡火災における死者発生経過、特に窒息/一酸化炭素中毒を死因とする火災による死者を調べ、それを焼損面積、発火源、着火物、出火場所、時間帯などから分析を行った。（詳細は青山^[2]を参照）

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。死者発生原因(死因)には火傷による死者と窒息/一酸化炭素中毒の割合は全体的に見てそれぞれほぼ半数であり、火災発生時に犠牲者が(2.1.) 火災室にいた時と、(2.2.) そのほかの場所にいた時で、それぞれ典型的なケースが見られた。

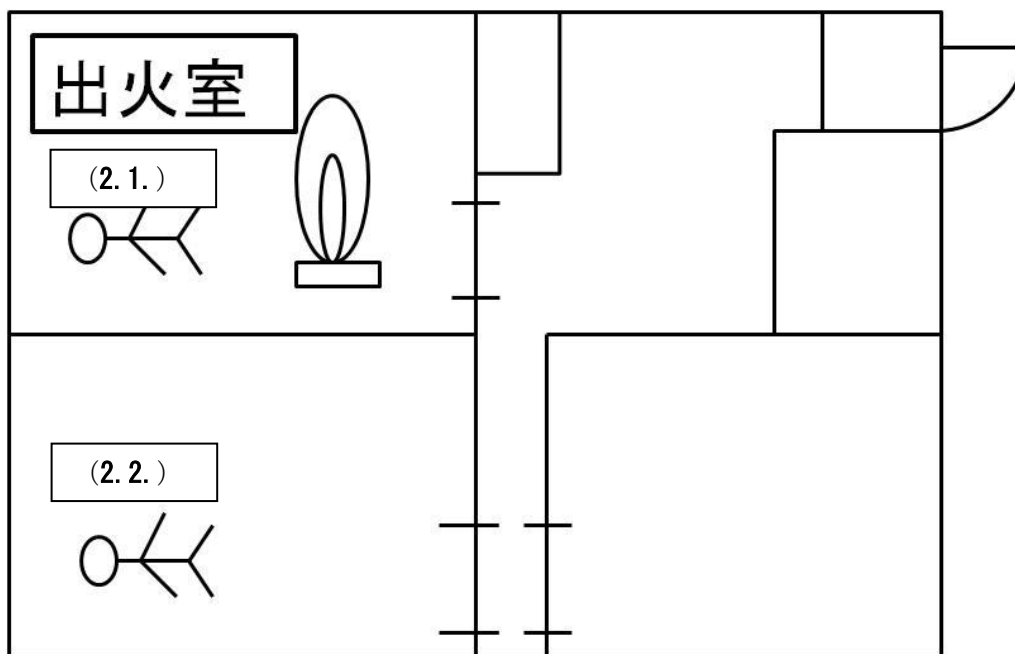


図2.1 火災発生時に犠牲者がいた場所

2.1. 火災発生時に犠牲者が火災室にいた場合

住宅火災による死者が出るケースの65%は火災発生時に犠牲者が火災室にいた場合である。そのうちの79%が出火場所から移動せずに亡くなっている。その数は住宅火災死者全体で見ても過半数を占める。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。

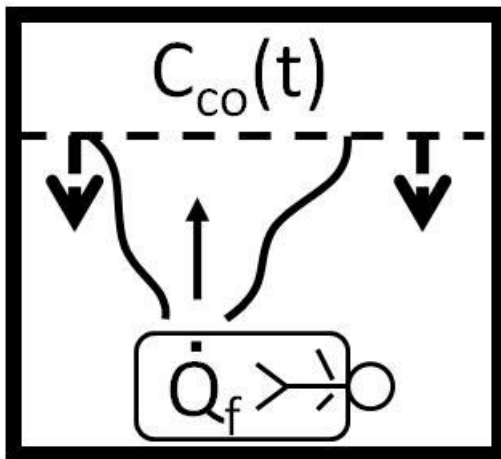


図2.2 火災発生時に被害者が火災室にいた場合

タバコによるくん焼火災の危険性について

火災発生時の発火源と着火物の組み合わせには、ある程度の傾向、死者が発生しやすい組み合わせがあることが分かった。ちなみに住宅火災で頻繁に発生する台所におけるコンロと動植物性油の組み合わせ、いわゆる天ぷら火災は死者火災に限ればそう多くないことがわかった。では多く発生する組み合わせとして、一つは居室におけるタバコとふとん、ゴミ箱などの組み合わせ。もう一つは居室におけるストーブと衣類などの繊維製品の組み合わせが挙げられる。これらのケースにおいて特に特徴的だったのはタバコを発火源とする火災である。

そもそもたばこは、**図2.3**からもわかるように住宅火災における発火源として非常に大きい割合を占めている重要な発火源である。住宅火災全体で見ればコンロを発火源としたいわゆる天ぷら油火災が大きな割合を占めるが、死亡火災に限った場合コンロの割合は大きく減少し、かわって、たばこが全体の37%を占めるようになる。ついでストーブ、コンロとつながる。

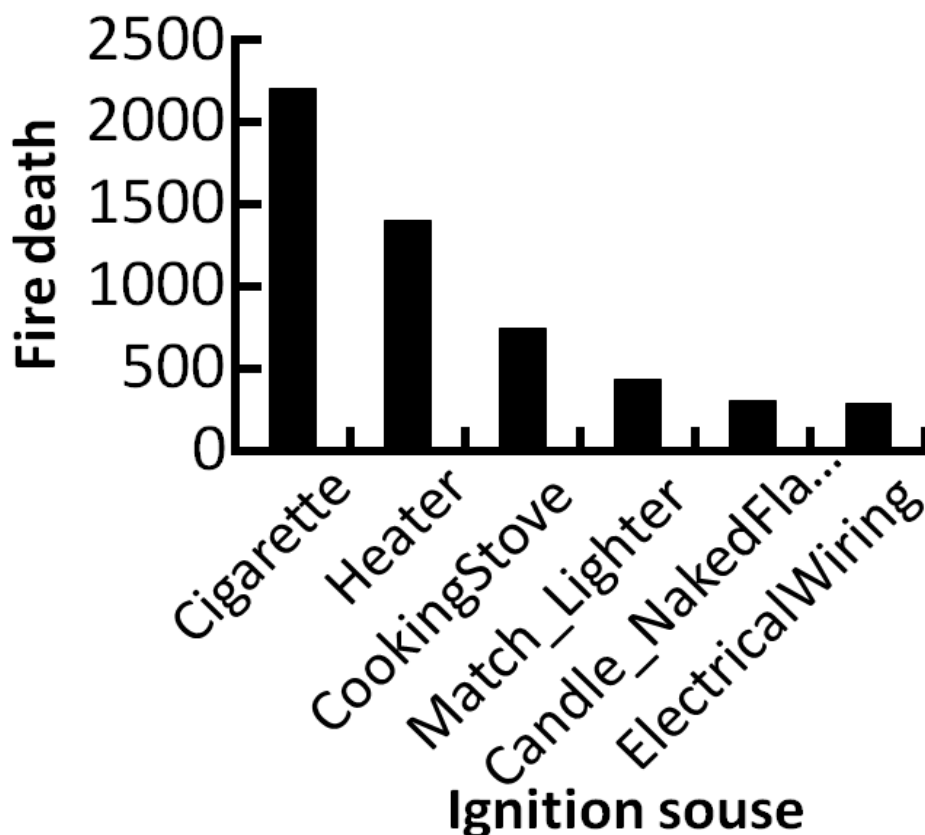


図2.3 住宅火災の死者火災における発火源の内訳

また、**図2.4**のようにタバコと着火物の組み合わせで最も多いのは布団、クッションである。

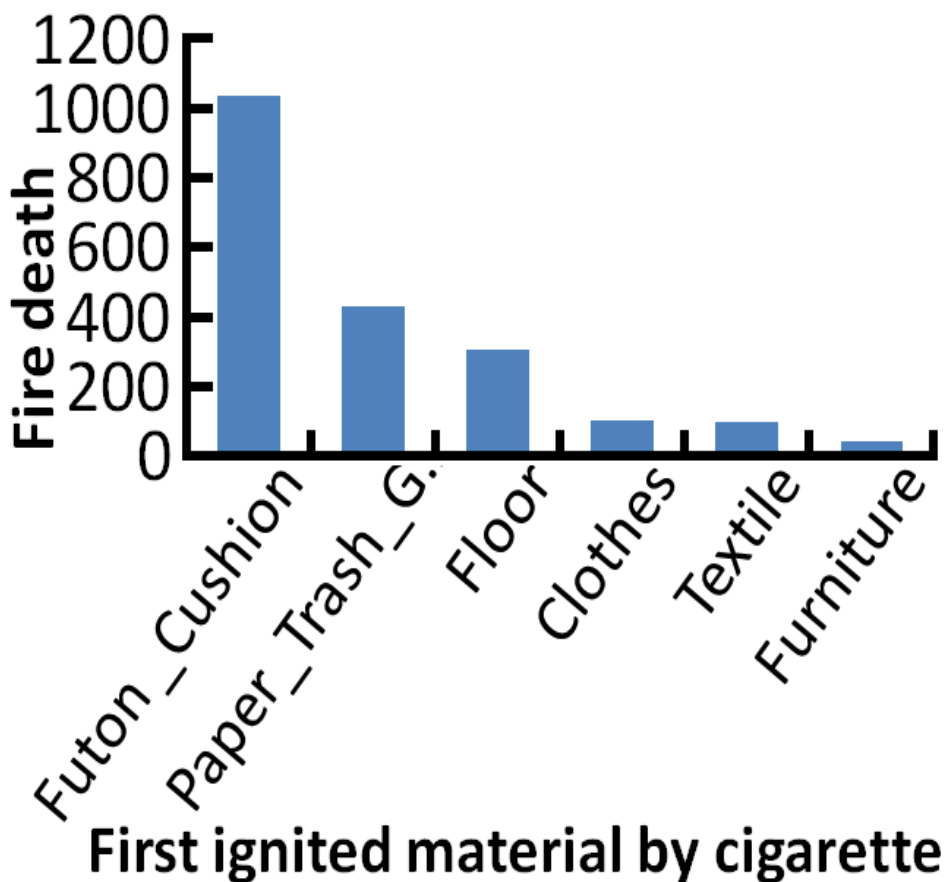


図2.4 タバコを発火源とする火災における着火物の組み合わせの内訳

ここで注目したいのは、詳細は第3章で述べるが、発火源としてのタバコは微小火源^[18]にあたるということである。火災初期において、微小火源は温度や発熱速度が非常に小さいため、着火物に着火直後もしばらくの間はくすぶったまま炎が出ない。着炎に至るまでにはかなりの時間を必要とするため、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。そのため、タバコを発火源とする火災の被害者のケースとしては十分な避難時間があったにもかかわらず、発見が遅れた、または発見したが既に避難能力を失っていたなどの理由から逃げ遅れ、死亡してしまった。など、逃げ遅れるに相応の理由があるはずである。

図2.5は、タバコを発火源とする火災死者とすべての火災死者をその死因の内訳で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。この場合、一酸化炭素の毒性で動けなくなった後炎で焼かれるケースや炎で身動きが取れなくなった上で大量の煙を吸引せざるを得なくなるケースが考えられるものの、タバコを発火源とする住宅火災で一酸化炭素によって多くの死者が発生していることを示している。

Causes of death in cigarette fires

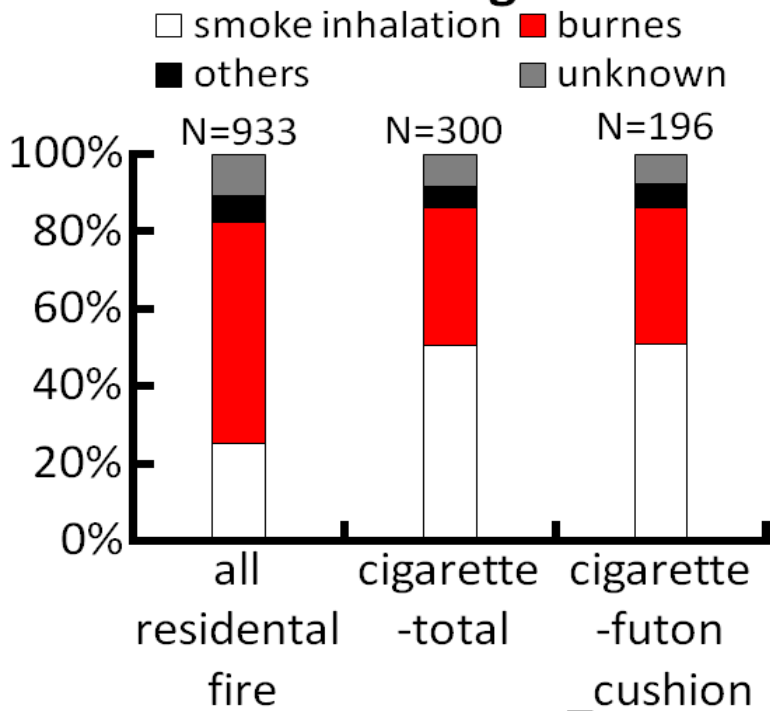


図2.5 タバコを発火源とする火災の死因の内訳

また、もう一点。焼損面積から見た火災の規模も死に至る経過に強く影響していることが分かった。焼損面積が大きい火災では死者が出やすく、死者が出る火災の95%以上が焼損面積10 m²以上の火災である。

注目したいのは焼損面積0.1m²以下の小規模火災である。こういった小規模火災はそもそも室内に火炎がほとんど燃え広がっておらず、死亡には至りにくい。例えば死傷者なしの住宅火災については、全体の46.9%が「ぼや」、18.8%が全焼であるが、死者を発生した火災においては全焼が62.0%と半数以上を占め、「ぼや」の割合は6.1%しかない。しかしながら、こういった小規模火災で死者が出るようなケースには、窒息/一酸化炭素中毒を死因とする死者が多く出る場合があることが分かった。

小規模な火災で死者が出るケースとして、大きく二つのケースを挙げることができる。一つ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。もう一つはコンロ、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、いわゆる着衣着火によって亡くなるケースである。

着衣着火であるかどうかは死者発生の経過という項目で確認することができるため、着衣着火のケースを除いた上で統計を取ることができる。焼損面積1m²以下の小規模火災では、着衣着火によるものが約半数を占めていた。しかしながら、着衣着火のケースを除いた場合に限れば、逃げ遅れ死亡したケースの多くが窒息/一酸化炭素中毒である事を確認することができた。

図2.6は、死者が出てしまった住宅火災における焼損面積の割合を、着火物との組み合わせごとに全数を1とする累積相対度数で表したものである。

死者火災のみを扱い、タバコを発火源とする火災と住宅火災全体との差のみに注目する。図から読み取れるように、タバコを発火源とする火災は住宅火災全体と比較して焼損面積の小さい火災における死者発生の割合が高い。このことは、住宅火災におけるタバコを発火源とした火災において、たとえ小規模な火災であったとしても人を死に至らしめうるということが示されている。

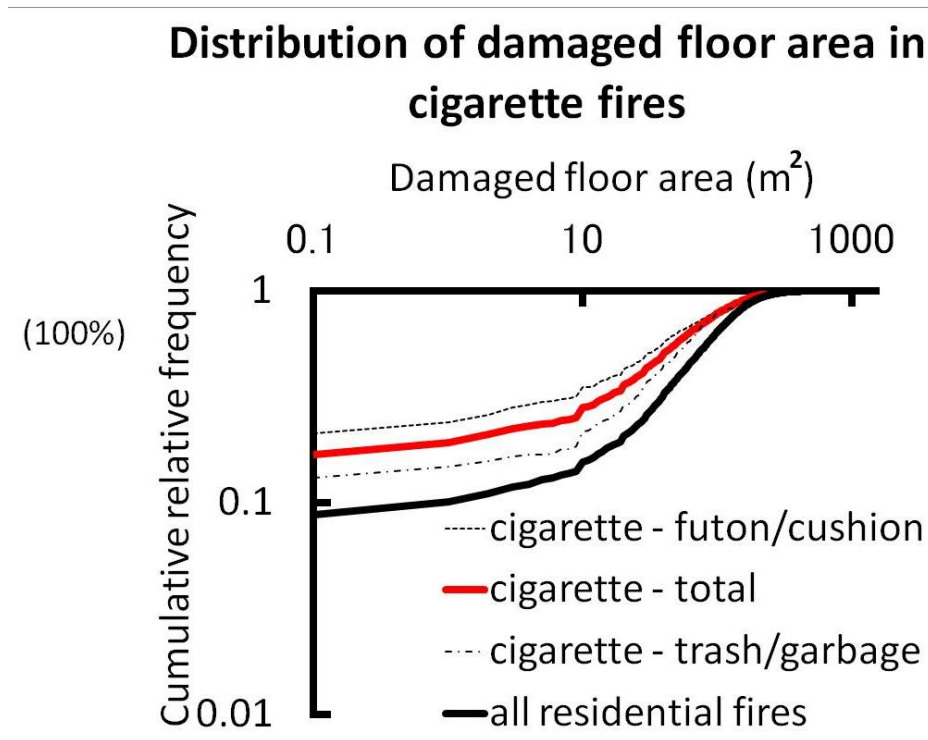


図2.6 タバコ火災における焼損面積の割合の内訳

2.2. 火災発生時に犠牲者が火災室以外の場所にいた場合

住宅火災によって死者が出るケースで、火災発生時に犠牲者が火災室以外の場所にいる割合は25.5%である。そこから移動せずに亡くなっている人は住宅火災死者全体の11.8%、移動した人は13.7%とやや多くなっている。

火災室以外の場所にいた人が亡くなるケースでは、火災が拡大し、火災室の火炎及び煙が火災室以外に漏れ出してしまうことによってその煙ないし熱や炎によって逃げ遅れた人が亡くなってしまうというシナリオが考えられる。

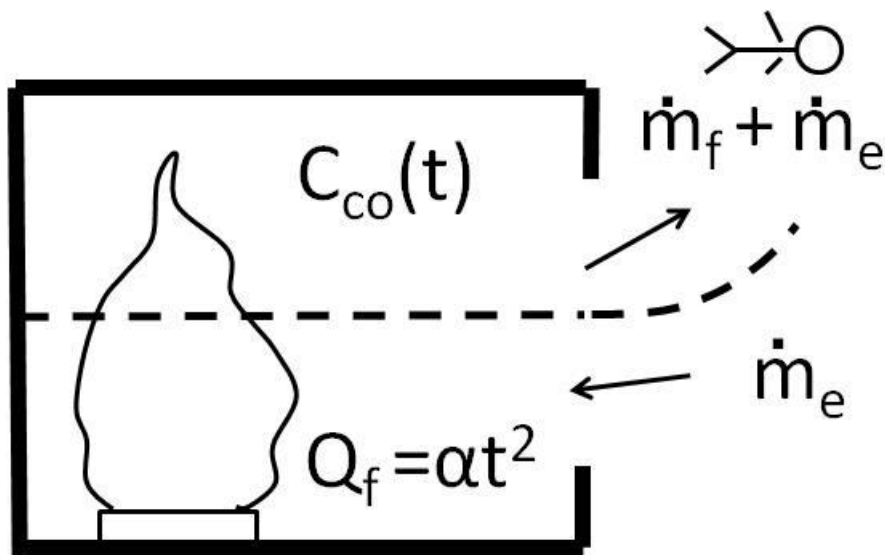


図2.7 火災発生時に被害者が火災室以外にいた場合

シナリオとして考えたような状況では、炎及び煙が火災室から漏れ出て火災を火災室に区画することに失敗している。こういったケースでは焼損面積が大きくなる場合が多く、出火パターンの影響が小さくなることが考えられる。統計データからも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、**図2.8**にあるようにその死因については火傷の30.9%に対し窒息/一酸化炭素中毒が56.1%と、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窒息/一酸化炭素中毒で亡くなる人の割合が高くなっていて、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。

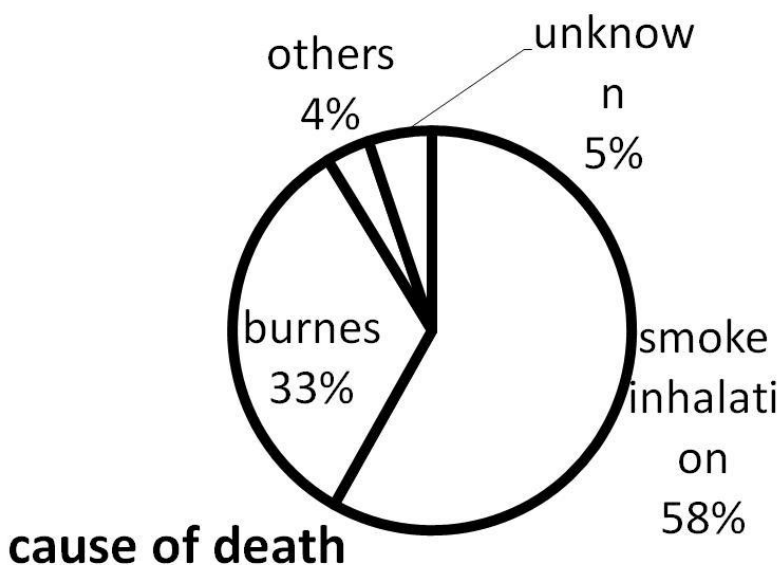


図2.8 火災発生時に被害者が火災室以外にいた場合における死因の割合

出火室内において初期拡大中の発炎火災では、酸素が十分にあると考えられるため、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。^[4]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。

まとめ

住宅火災において人が亡くなるケース、特に一酸化炭素が原因で亡くなる場合についてその典型的なシナリオの割り出しを行った。主に窒息/一酸化炭素中毒であるかどうかの死因から、統計データの分析を行い、大きく二つの典型的なシナリオを抽出した。

一つは火災発生時に犠牲者が火災室にいたケースである。このケースにおいて、たばこを発火源とする火災で亡くなっている人が非常に多かった。タバコは火災初期においてくん焼を経る特性から、炎よりも先に煙による被害にあっている可能性が高い。実際に窒息/一酸化炭素中毒によって亡くなっている人の割合も高くなっている。その死者の多くが発見遅れによって死亡に至っており、燻焼状態に気づかずに、煙に巻かれて死亡したものと推測される。また小規模な火災にも関わらず人が亡くなるといったケースの割合も高く、くん焼が発生し、着炎に至る前にその煙によって死亡、ないし避難が困難になるほどの重傷を負っているというシナリオが考えられる。

もう一つは火災発生時に犠牲者が火災室以外の場所にいたケースである。このケースにおいては、逃げ遅れの死者が多く、死者の半分以上が「CO中毒・窒息」で死亡している。これらのケースでは焼損床面積が大きな火災の割合が高く、出火パターンが死因等に与える影響は小さい。シナリオとしては火災盛期に発生する一酸化炭素が、炎よりも早く建物内に充満し、その毒性によって死亡しているといったものが考えられる。

第3章文献調査結果

はじめに

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. くん焼火災の性状について

燃焼には炎を有する有炎燃焼と有しない無炎燃焼があり、くん焼とは無炎燃焼の一種である。^[18]たばこを初めとして、線香、火花及び火の粉などの火源も無炎燃焼の一種であり、その燃焼部分の形状及び見かけ上のエネルギー量（光、熱など）が極めて小さいため微小火源と呼ばれる。

微小火源による火災は、初めから炎が立ち上がるのではなく、布団や紙くずなどの着火物が無炎燃焼を継続し、ある程度燃えこんだ後、周囲の条件（空気の流動など）により炎となって燃え上がる。この燃焼状況を、火災調査上は「無炎燃焼による着火」として取り扱っているが、化学的にはこの燃焼形態は「くん焼」と言われている。

一般的な燃焼は、固体可燃物が熱により分解し（熱分解）、これにより発生した可燃性ガスが酸素と混合し、これが炎として燃焼し、火炎伝ばしていく。くん焼熱による炭素を含んだ固体残さ物が直接酸素と反応して、固体表面において無炎燃焼する。この無炎燃焼をしている高温の固体残さ物が周囲の未燃焼部分を加熱し、そこが熱分解により新たに炭化残さ物を作り、再び固体表面で燃焼しそれが継続される。この時、固体の熱分解で発生した気体や煤が、大気中へ放散されるが、熱分解で発生した沸点の高い気体は周囲の空気によって冷却されるため、凝集して液体微粒子となり、固体微粒子である煤と共に大気中に煙として浮遊する。

無炎燃焼は可燃性ガスによる発火燃焼ではなく、固体表面での燃焼であることから、空気の供給量が燃焼の継続に影響する。紙巻きたばこが喫煙しなくとも燃焼が継続するのに対して、葉巻では通気性に乏しいため立ち消えする。逆に燃えにくいとされているものであっても、通気性を保ちつつ適度に詰め込むと無炎燃焼を継続する。

くん焼は、火災の初期の性状を特徴づけるばかりでなく、成長期やフラッシュオーバー時においても起こり、火災による人的、物的損害を大きくする原因となっている。微小火源による火災は、燃焼器具、電気器具などからの火災と異なり、出火箇所に発火源となるものが残らないことがほとんどであり、発火源と思われるものを物的証拠として追跡することは困難である。

くん焼の際に発生する熱分解ガスには一酸化炭素を初めとした多量の燃焼生成ガスが含まれ、燃焼によって分解されないため長時間にわたって蓄積する。そのため、くん焼によって発生した燃層生成ガスが許容限界値を超えて発生していた場合、燃焼が発炎に至る前に燃焼生成ガスを吸って自力避難困難な状態あるいは死亡してしまうケースが起こりうることが疑われる。

住宅火災において、くん焼火災が発生する典型的なケースは①布団の上に火源が落ちる②火源の上に布団がかぶさる③布団とふすまなどの間に火源が挟まるという3つである。なかでも③のケースはくん焼が大きく成長し、発火に至る場合が多い。

くん焼の成長を左右する要因は換気と保温であり、そのうちの換気である酸素の供給方向からくん焼は大きく二種類に分類されている。すなわちディバース（逆方向）とフォワード（順方向）である。^[15]

フォワード (forward) とはくん焼の進行方向と酸素の供給方向が一致している状態である。この場合、酸素はすでに燃焼した部分 (炭、char) を通過してくん焼の先端部分 (熱分解が発生している部分) に到達する。そのため熱分解している部分に空気が到達するときには、酸素の大半はすでに消費されており、熱分解の進行はすでに燃焼した部分 (char) からの熱の伝導に頼らざるを得ない。しかしながら、熱分解ガスが燃焼することなく大量に発生するため、ディバースと比較して火炎に発展しやすい。

ディバース (reverse) はフォワードとは逆にくん焼の進行方向と酸素の進行方向が逆になっている状態で、熱分解と同時に生成ガスの燃焼が行われるためくん焼の進行が早い。

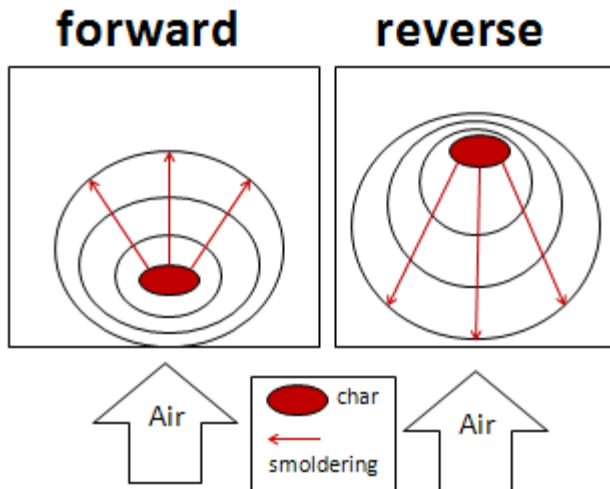


図3.1 くん焼火災の火災性状の模式図

3.2. 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（COHb）濃度と相関のあるCO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。

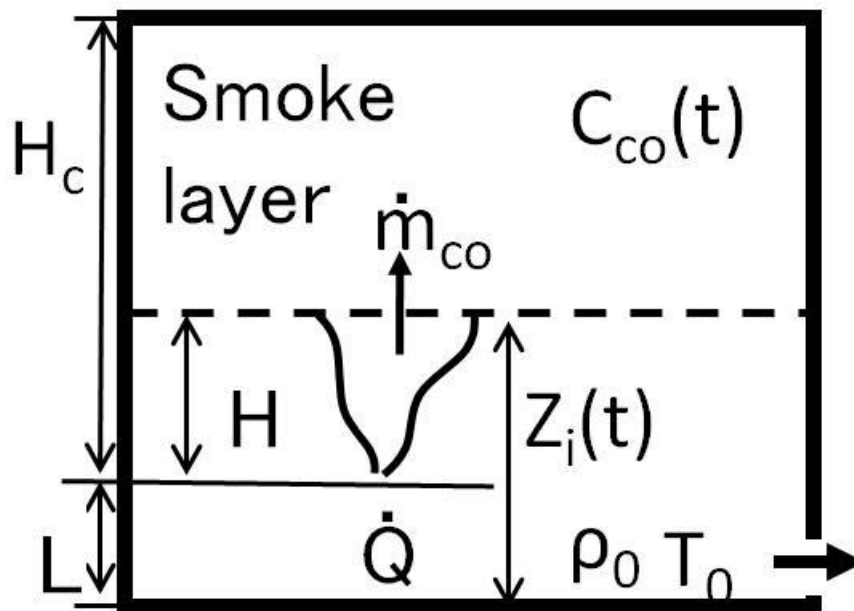


図3.2 Quintiereの計算モデルの模式図

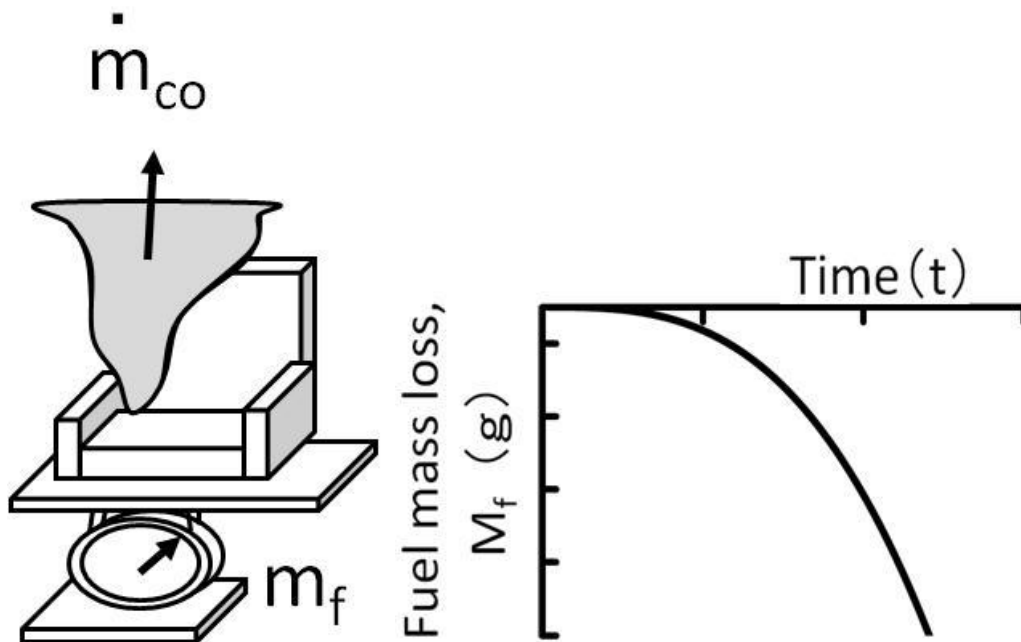


図3.3 布張りソファの燃焼実験の図

図3.3の重量減少量から燃焼によって発生した一酸化炭素量を計測し、図3.2のゾーンモデルに入力した。CO暴露量とは人体が接触した一酸化炭素濃度を時間積分したもので、これによってQuintiereはソファのくん焼火災における一酸化炭素の危険性を評価している。その結果が図3.4である。

Quintiere et al. [1982]の研究結果

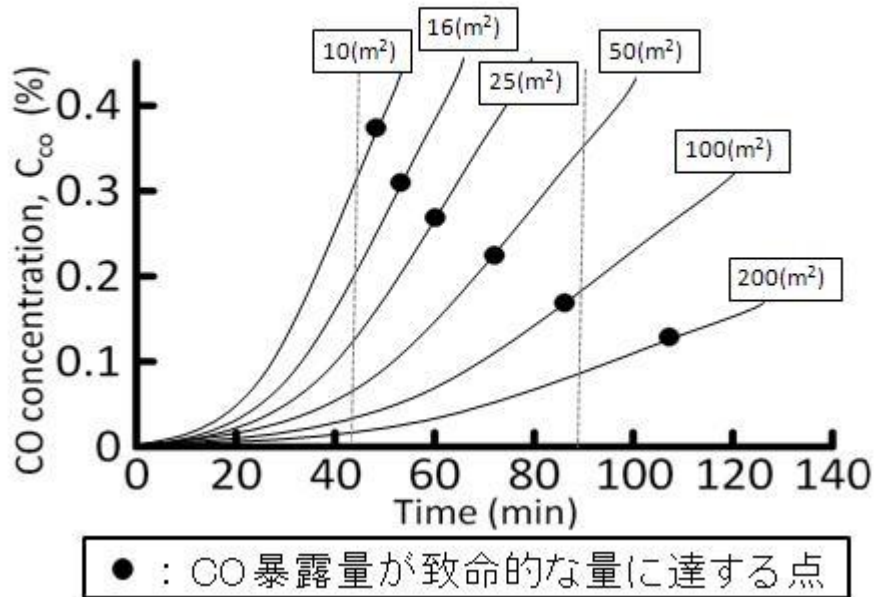


図3.4 くん焼火災における室内CO濃度の変化

図3.2は各床面積の部屋において、同じくん焼が発生した場合に、曝露量が危険域に達するまでに要する時間を表している。危険域に達するまでに要する時間は基本的に40分から80分の間に収まり、仮に部屋面積が200m²であっても110分程度に収まるなど部屋の大きさにあまり左右されないことが分かる。

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あたりに発生する一酸化炭素の割合を示す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%の布団が最も早くくん焼し、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。

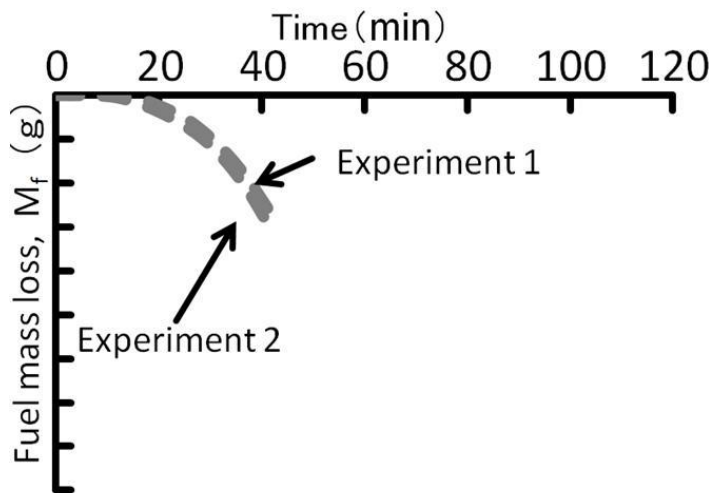


図3.5 布団(綿100%)の重量減少のようす

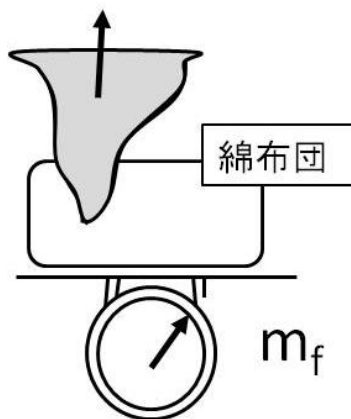


図3.6 布団くん焼実験の図

3.3. 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]らにより開始された。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。

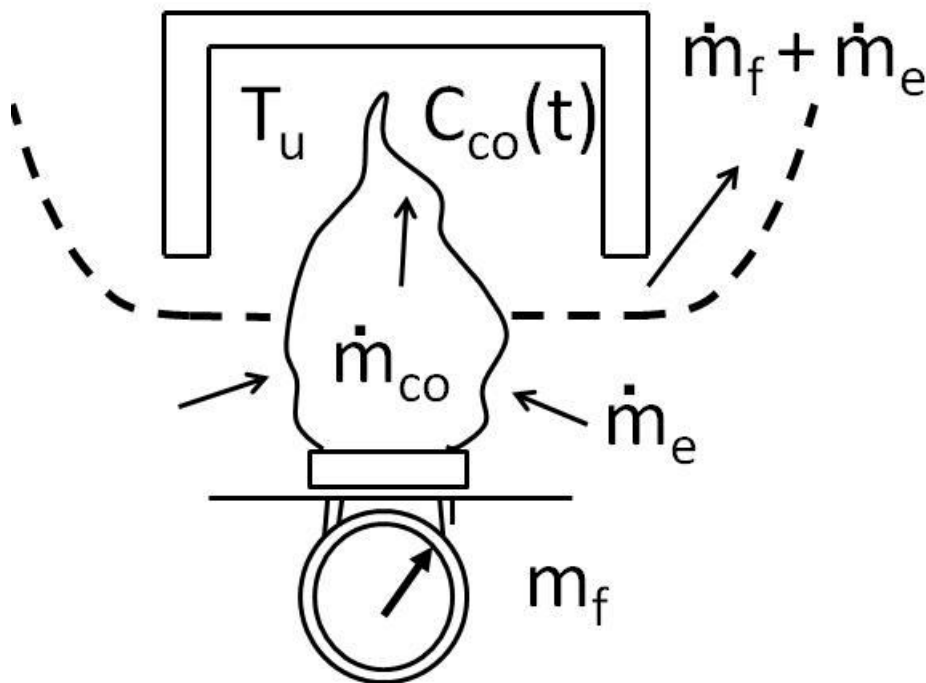


図3.7 Toner, Morehart, Beylerらによる実験の模式図

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。

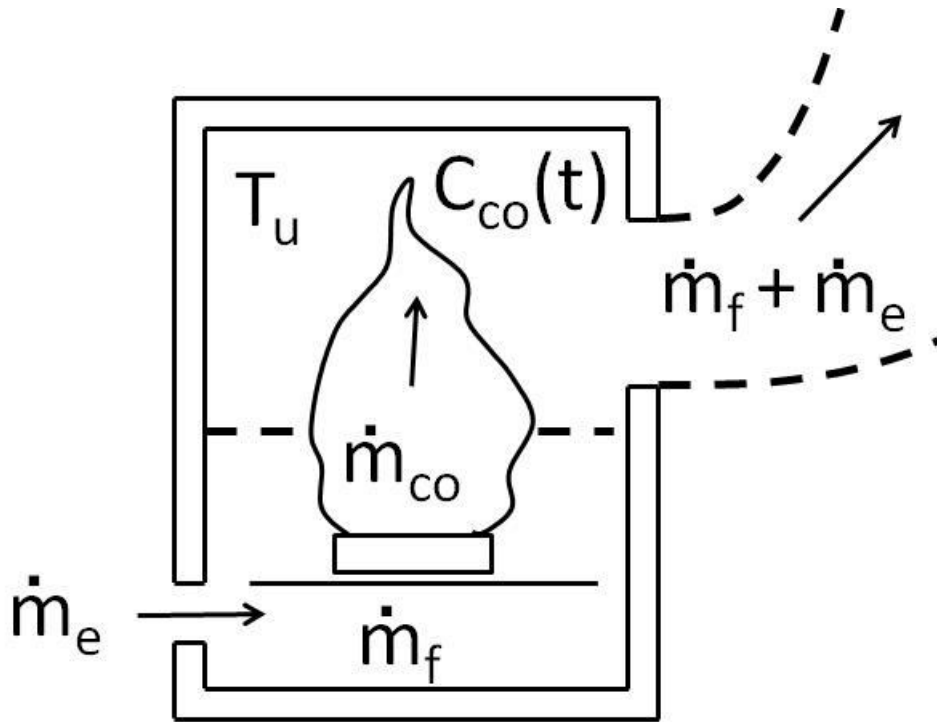


図3.8 Gottukらによる実験の模式図

またこの際にGottukは実際の区画火災のような高温環境では煙層内の一酸化炭素が反応してしまい、GERモデルが適用できないことを示した。また外部噴出火炎にも注目し、着火条件やそれによる煙層内の成分変化についての予測方法を示した。

図3.9のように一酸化炭素のイールド値は燃焼材によらず、Equivalence Ratio (ϕ) の関数になっている。ベイラーによる実験結果は、区画火災による換気支配型燃焼の実験としては温度が700K程度と小さく、区画火災の実情を表すデータには至っていないものの、ゴタックの結果をみると、換気支配型火災に移行したのを境にCOイールドが大きく上昇し、0.2に収束していることが分かる。

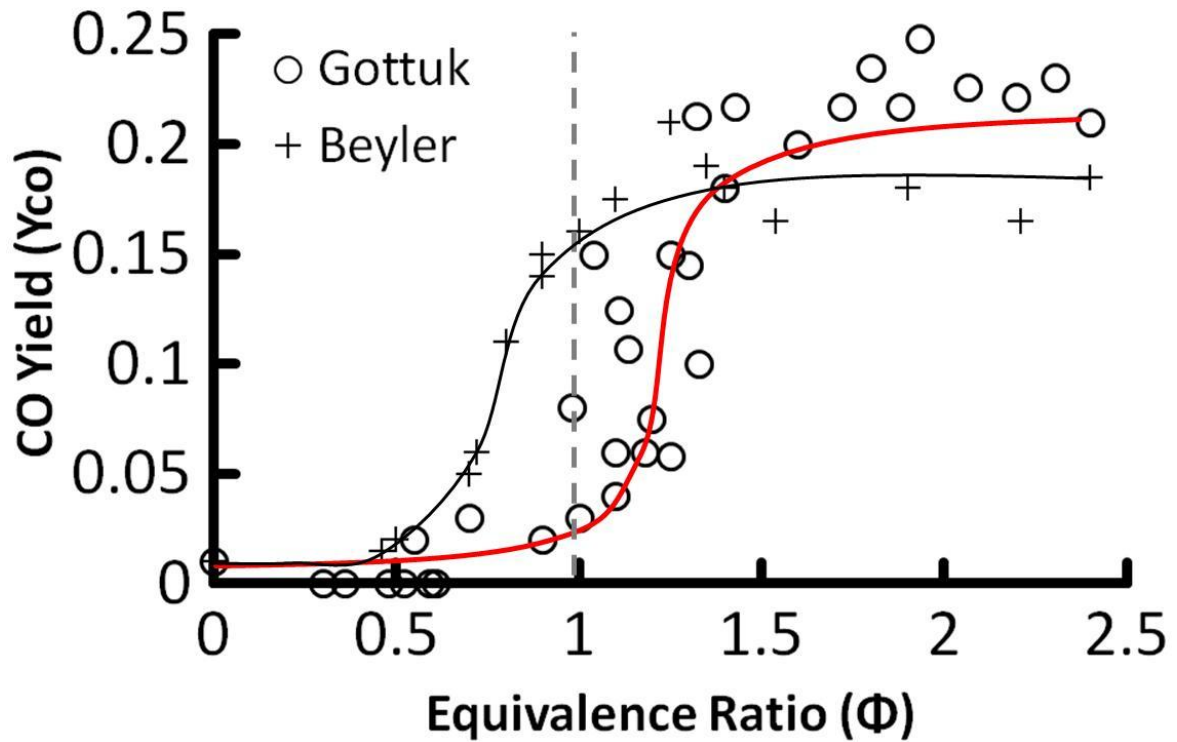


図3.9 ERとCOイールドの計測結果

ここでいうEquivalence Ratio (ϕ) とは、燃料の熱分解速度（重量減少速度）と酸素供給量のバランスを示す指数 のことで

$\Phi < 1$ で酸素十分（燃料支配型燃焼）

$\Phi > 1$ で酸素不足（酸素支配型燃焼）

となる。

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。Pittsも独自のエンジニアリングモデルを提案しているが、Gottukと異なり、具体的な計算方法がなく直ちに適用できない条件が含まれている。

ず

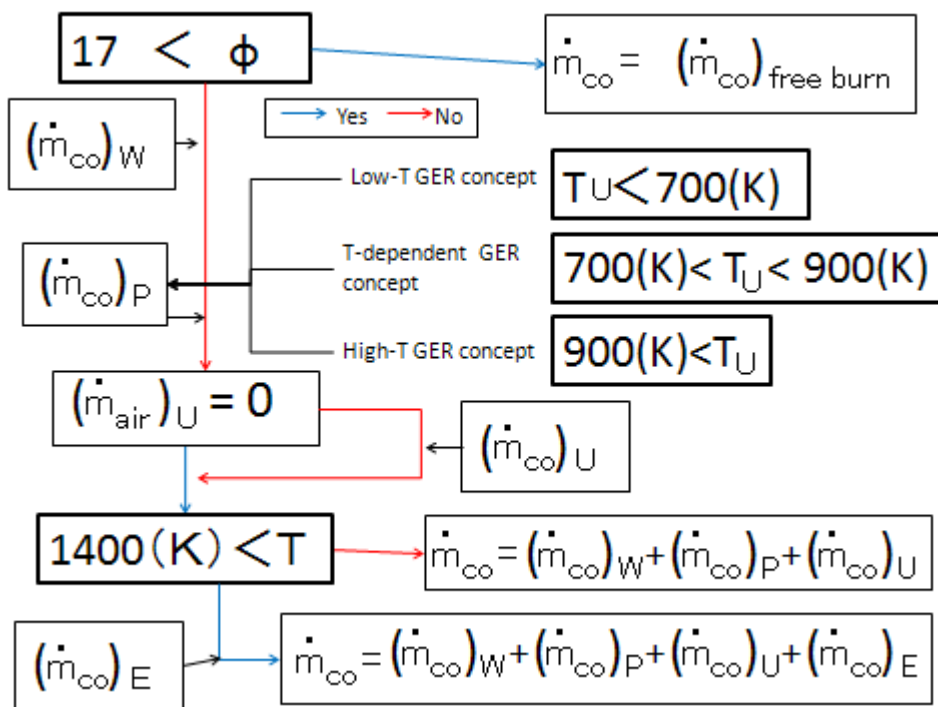


図3.10 GERエンジニアリングモデル条件分け

図3.10はPittsの提案したエンジニアリングモデルの条件分けである。Pittsは煙層内部の可燃物の有無、煙層内部の煙層自身の温度による化学変化によって引き起こされる成分変化、煙層内部に直接流入する空気の有無などGERモデルが通用しない条件を取り上げ、それぞれについての一酸化炭素量へ与える影響を図3.11、図3.12、図3.13のように全て計算することによってより実態に近い一酸化炭素濃度変化の予測が可能であるとした。

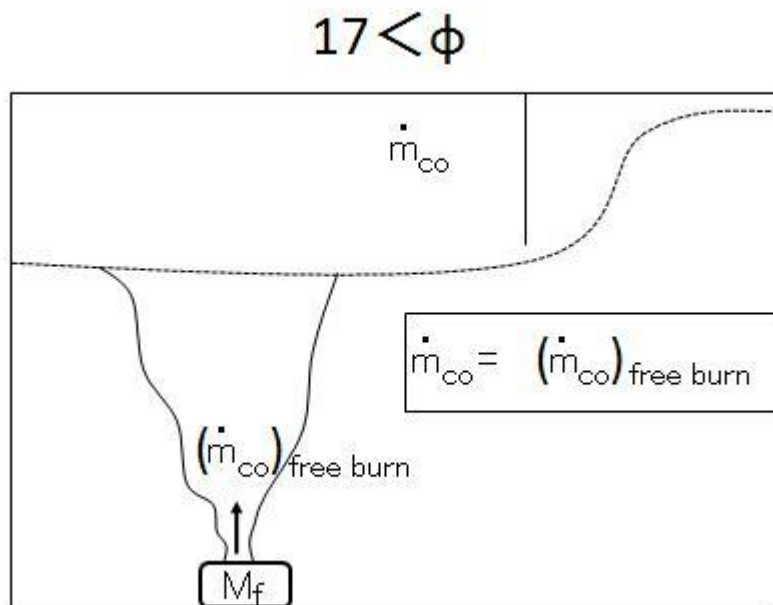


図3.11 エンジニアリングモデル計算模式図

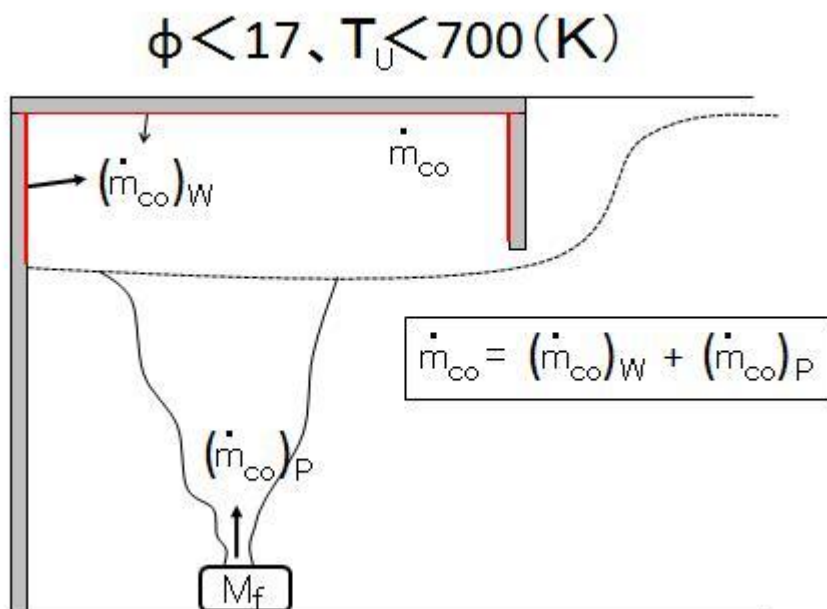


図3.12 エンジニアリングモデル計算模式図

$$\phi < 17, 700 \text{ (K)} < T_U, (\dot{m}_{\text{air}})_U > 0$$

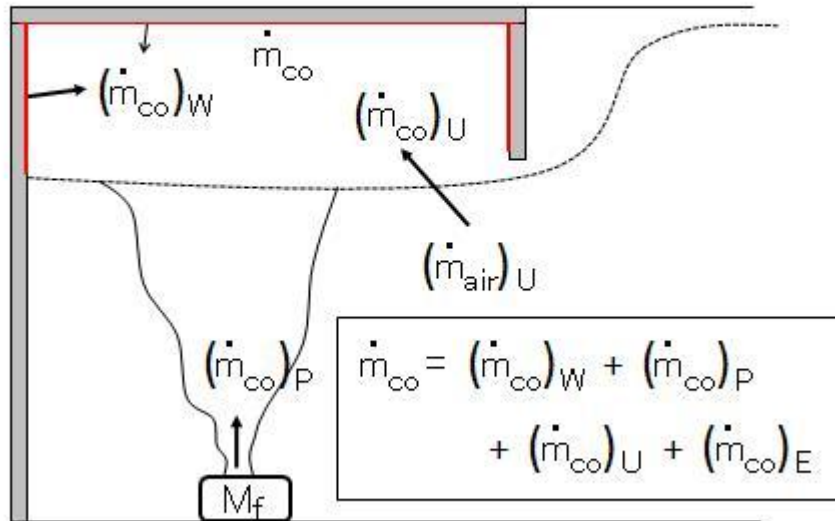


図3.13 エンジニアリングモデル計算模式図

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。

再現したのは高齢者住宅における住宅火災で、**図3.14**のような6畳の居室でこたつやストーブを初期火源とする火災を、**図3.15**、**図3.16**のように火源の発熱速度と重量減少速度を測定したうえで実大実験を行っている。

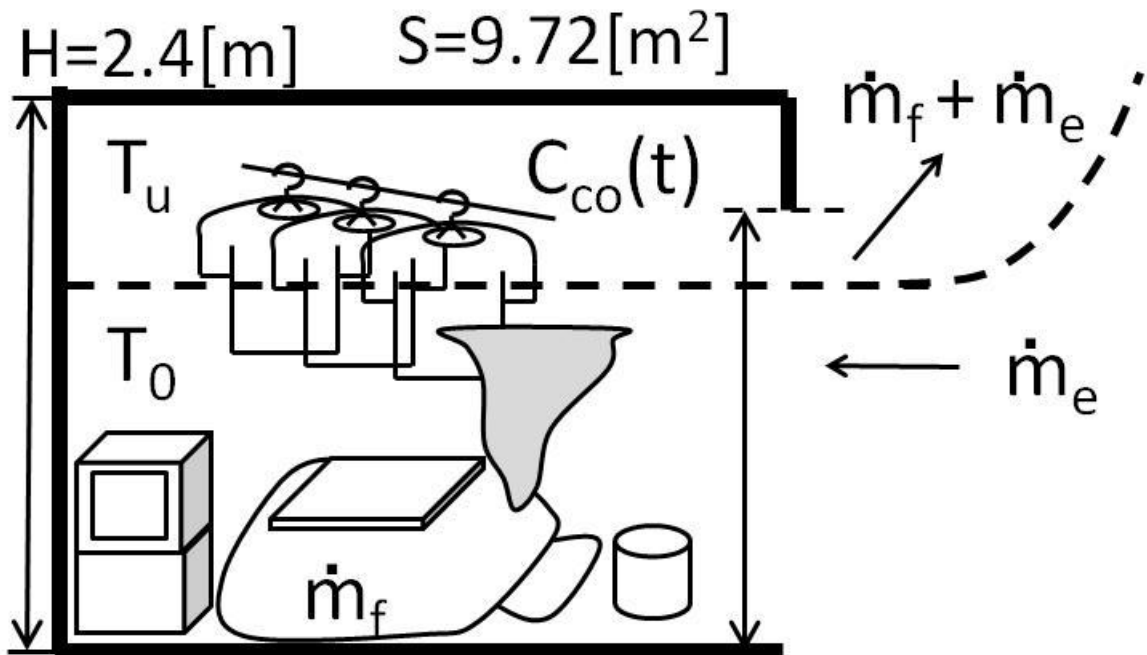


図3.14 実大火災実験の模式図

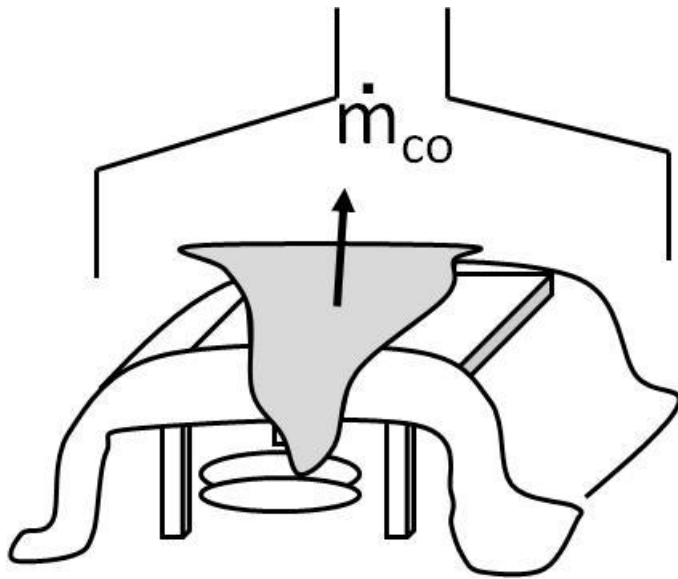


図3.15 火源の発熱速度の測定（内容物の測定）

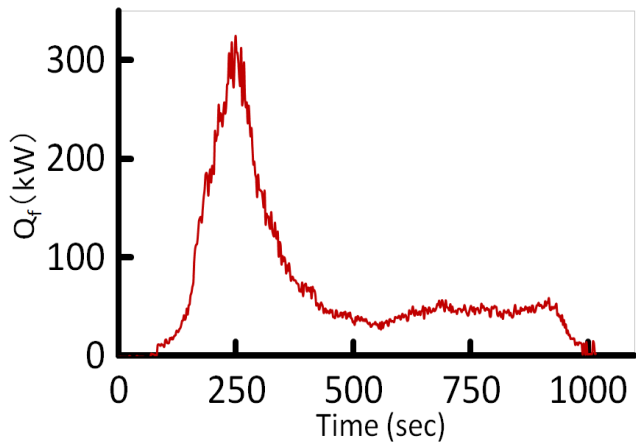


図3.16 火源の発熱速度の測定結果

この実験の結果として、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。

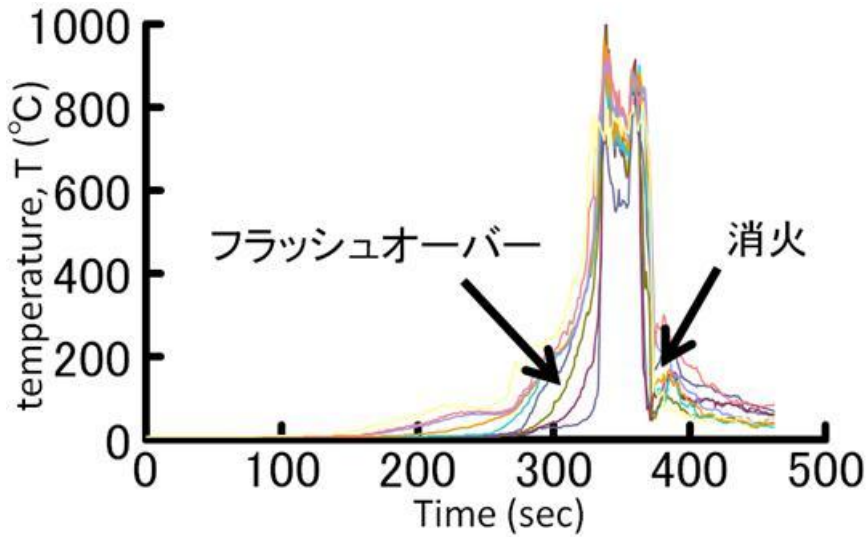


図3.17 区画火災における煙層内温度変化

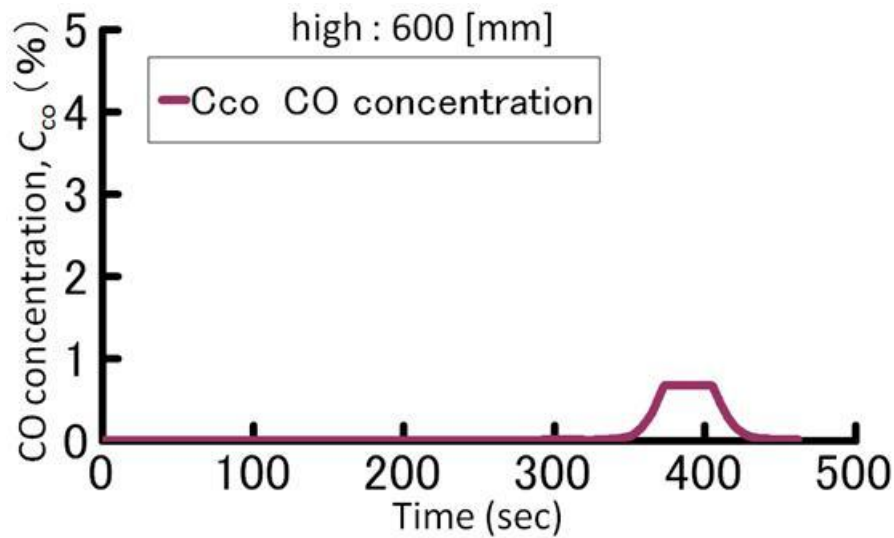


図3.18 区画火災における一酸化炭素濃度変化（高さ600mm）

3.4. 火災時に発生するガスの毒性について

はじめに

一酸化炭素が原因で亡くなる経緯を知る上で、その人が一酸化炭素が原因で亡くなったのかどうかを判断する必要がある。その判断のための項目が死因である。住宅火災における死因は大きく分けて二つに分類される。一つは窒息よりも先に、火炎の熱や火炎に直接さらされることによる火傷によって亡くなる場合。もう一つは火炎にまかれる前に煙などを吸って、その中毒症状や窒息によって亡くなる場合。その判断基準を知る上で、ガスの毒性に関する研究を把握する必要があった。

火災における人的損失、特に火災発生時に火災室以外の場所にいた人の死因の多くが煙によるものである。火災時に発生するガスは、炎よりはるかに広範囲かつ速やかに伝播し、それに対する人間の生理的限度が非常に低いため、火災の規模が小さかったとしても十分な殺傷力を維持していることが原因である。

東京消防庁では^[13]、死因の決定は、東京都監察医務院による判断が多くを占め、他に救急病院や死者を扱った警察医の判断によっている。その判断は、血液中的一酸化炭素・ヘモグロビン濃度(COHb濃度)を目安として、おおむね60%以上である場合は、死亡する前に煙を相当量吸って死亡「CO中毒死」と判断され、10%以下であった場合は煙を吸引しないうちに死亡「火傷死」と判断され、その中間のCOHb濃度を一酸化炭素中毒と火傷の両方が死に影響してどちらとも決められないものとして「焼死」としている。このため、火災による死者の「体表炭化度」と「火傷・焼死・CO中毒死」との相関性はないが、火災現場においてはしばしば体表炭化度の大きさから焼死や窒息を判別され、誤解される例が多くある。

HCN(シアン化水素)はCOと並んで重視される化学物質である。COの10倍の毒性を持つため、火災における死者へ、大きく影響を与えていることが考えられるが、体組織標本中のHCN濃度は変化しやすく、その研究のためには死後できるだけ早く標本を採取して、分析にとりかかる必要がある。

現在、[6] I S Oでは、火災時の有毒性ガス発生状況のモデル化、火災生成ガスの科学的分析手法の標準化、ガス毒性評価に関するガイドラインの作成、ガス毒性予測評価手法の開発などを行っている。これらの作業を有効に進める上で、各国の火災統計資料の整理、燃焼生成ガスを動物に暴露した際の影響の分析とモデル化、材料の燃焼試験装置の特性の分析と整理、燃焼生成ガスの分析手法の調査とその長所及び短所の分析に力を入れてきた。

その際に定められた基準の一つとして暴露時間をもとにした危険度の指標が定められている。

最近では、世界的に動物を用いた実験を実施することが困難になってきたので、焼死者から血液を採取して、その中の毒性成分濃度を分析し、資料化しようという動きも出てきた。

また、米国を中心にハロゲン系成分の毒性評価を精密化しようという試みが始まった。ハロゲンは、有機材料の難燃性を高める成分として大量に使われてきており、これらの材料が燃焼した際の毒性の強さの解釈が社会に与える影響が非常に大きいということがこの背景にある。また、収納物に使われる材料の燃焼性状についても、十分にデータを収集し、建材のデータと比較検討を加えていくことが重要と考えられている。

一酸化炭素の分析は、死因の解明をするために最初に焼死者からとられるデータの一つである。体液及び血液を採取するのはそれほど困難なことではなく、COヘモグロビン自体の安定性もいい。そのため、体内を循環しているCO-Hb濃度が、CO中毒のいい指標となっている。

CO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 (COHb) 濃度を予測する手法が報告されている。

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 (COHb) 濃度を予測する手法が報告されている。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CO濃度値 (ppm または%) を時間 (min) 積分して計算される (式(1)) 暴露量 (CO-dose) を、許容限界値 (Ct) と比較する方法が一般的である。その許容限界値は (Ct) 3.5 (%・min) で、許容限界値 (3.5%・min) を超えた場合 (すなわち、COHb濃度が30%~40%を超えたとき) 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。

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

第4章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

予測方法

図4.1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(\dot{m}_f)に燃焼熱(ΔH)を掛け合わせて発熱速度変化(\dot{Q}_f)を式(2)、CO イールド値(Y_{CO})を掛け合わせてCO 発生率(\dot{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CO 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CO濃度がどのように変化するか予測計算を行った。

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

$$\dot{m}_{CO} = Y_{CO} \cdot \dot{m}_f \quad (3)$$

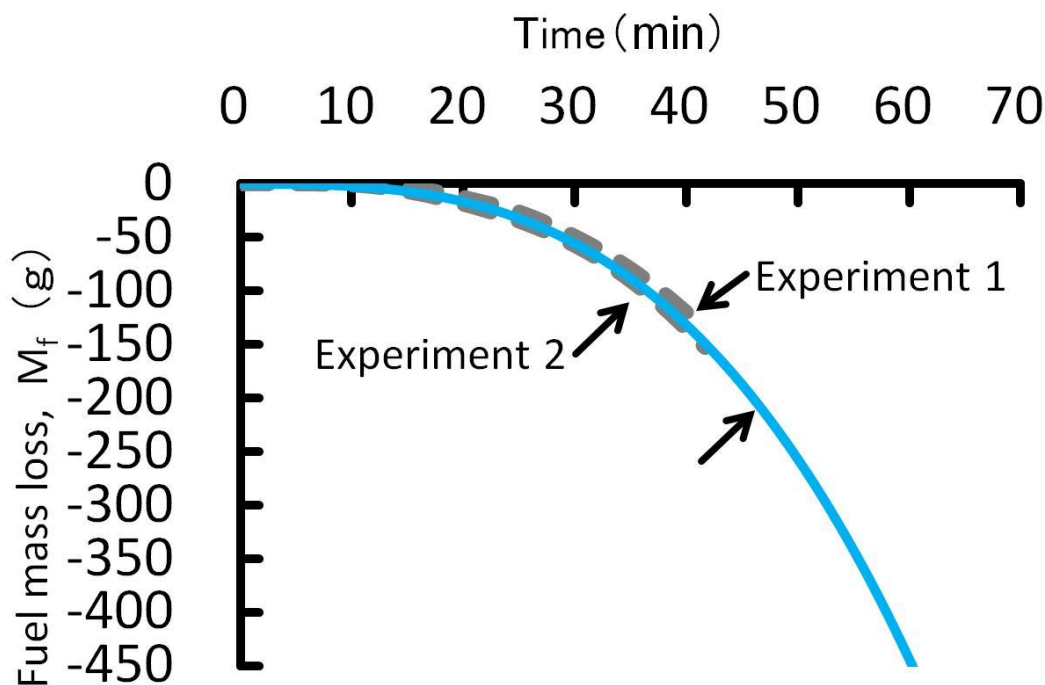


図4.1 布団(綿100%)の重量減少のようす(実験値と外挿曲線 $M_f = M_0 - (9.5 \times 10^{-9} \cdot t^3)$)

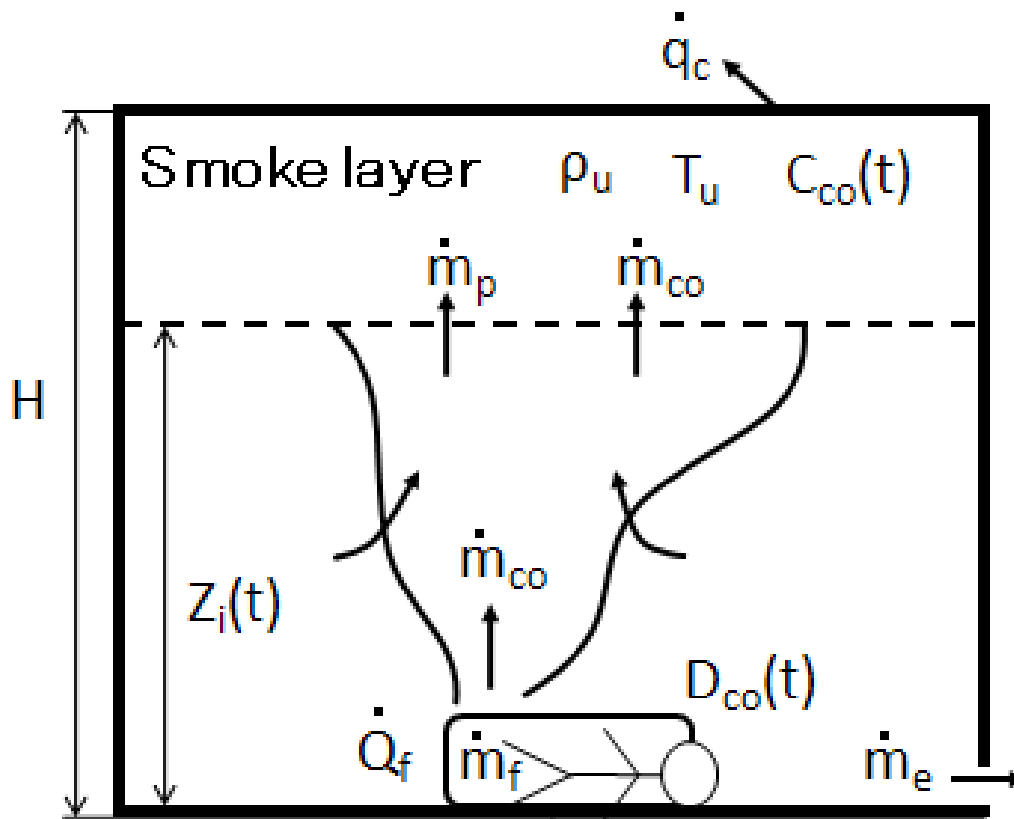


図4.2 くん焼時、計算モデルの模式図

計算条件は、万本らの実験に合わせて図4.3のように設定した。六畳間に相当する床面積10.0 m²、天井高2.4 mの室内で火源の綿布団が燻焼を開始し、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する。

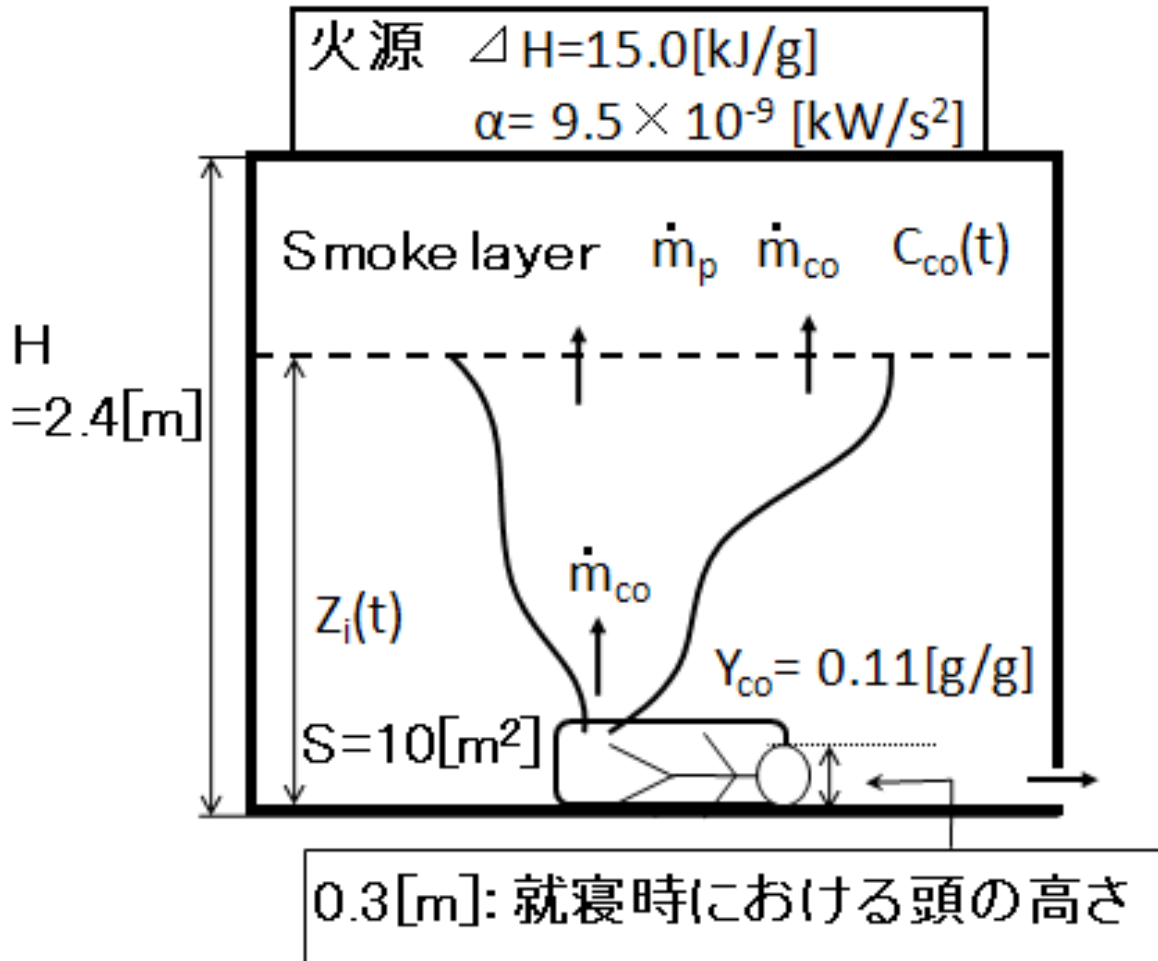


図4.3 くん焼時の計算条件

計算結果を以下に示す。図4.4は煙層の高さの時間変化。図4.5は煙層内の一酸化炭素（CO）濃度の時間変化である。煙層は燻焼開始後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CO濃度は0.007%（70 ppm）で、人体に大きな影響を及ぼす程の濃度ではない。その後、CO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、CO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。

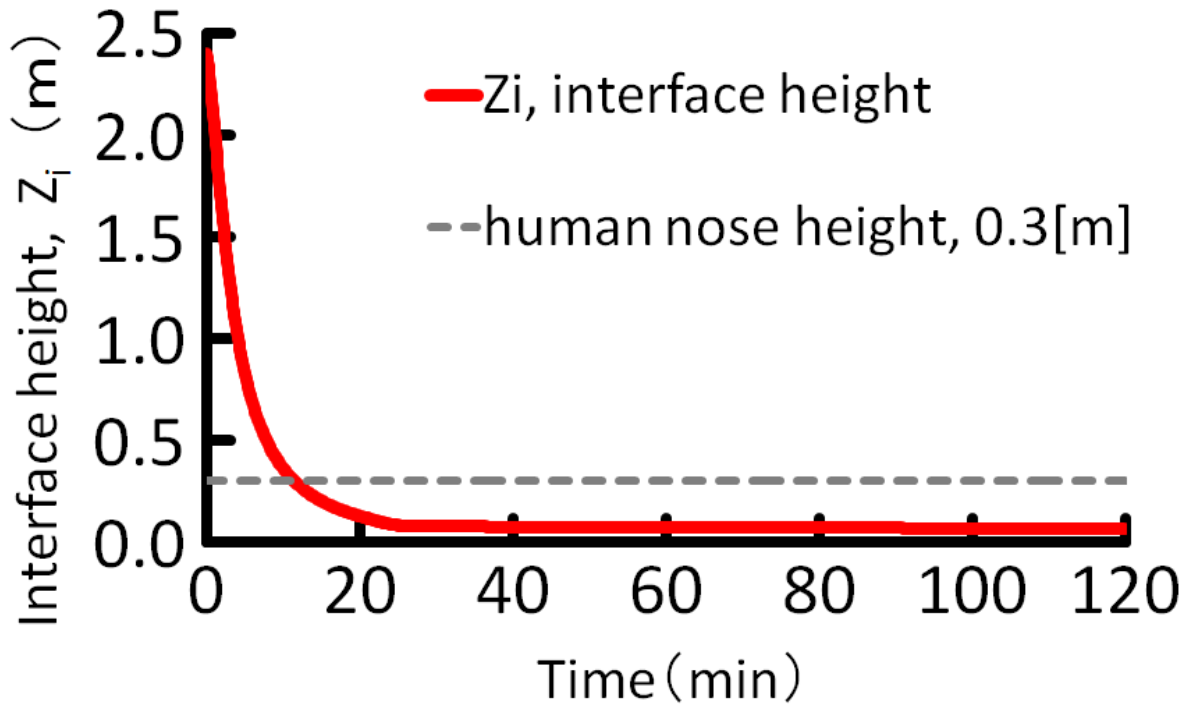


図4.4 くん焼時、煙層高さの時間変化

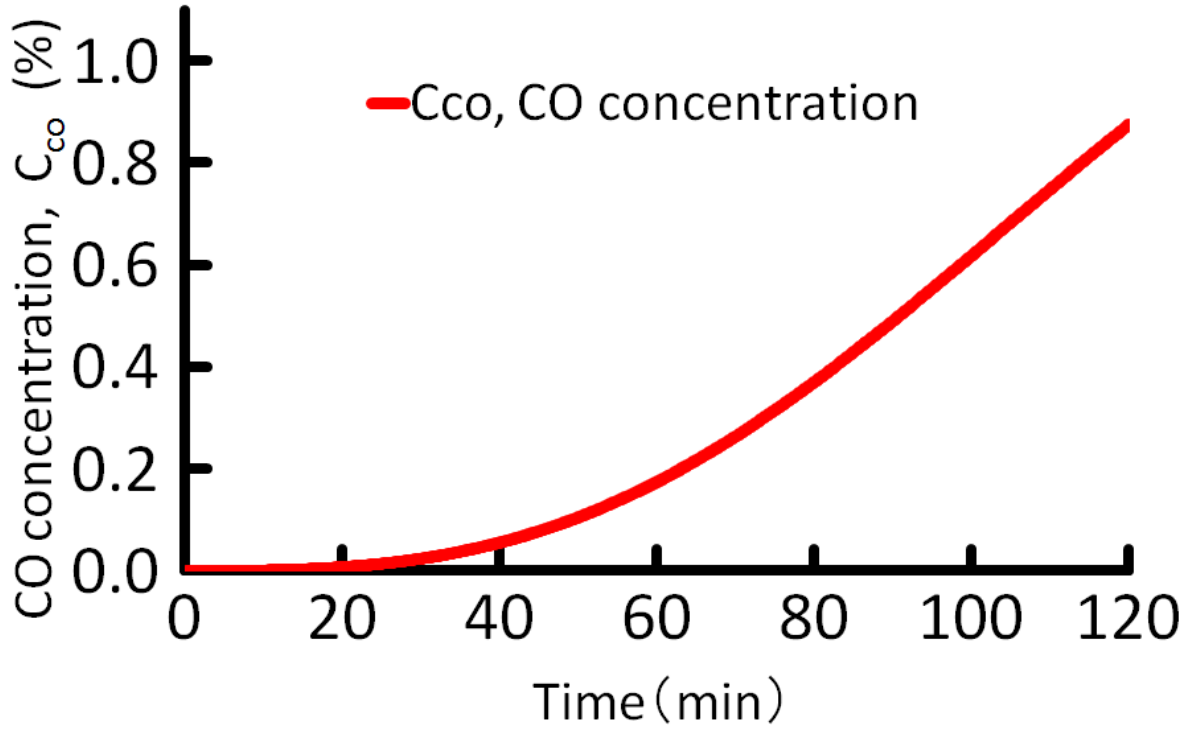


図4.5 くん焼時、煙層中の一酸化炭素濃度変化

図4.6は火災発生に気づかずに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。

煙層が床面付近に達した後、CO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。

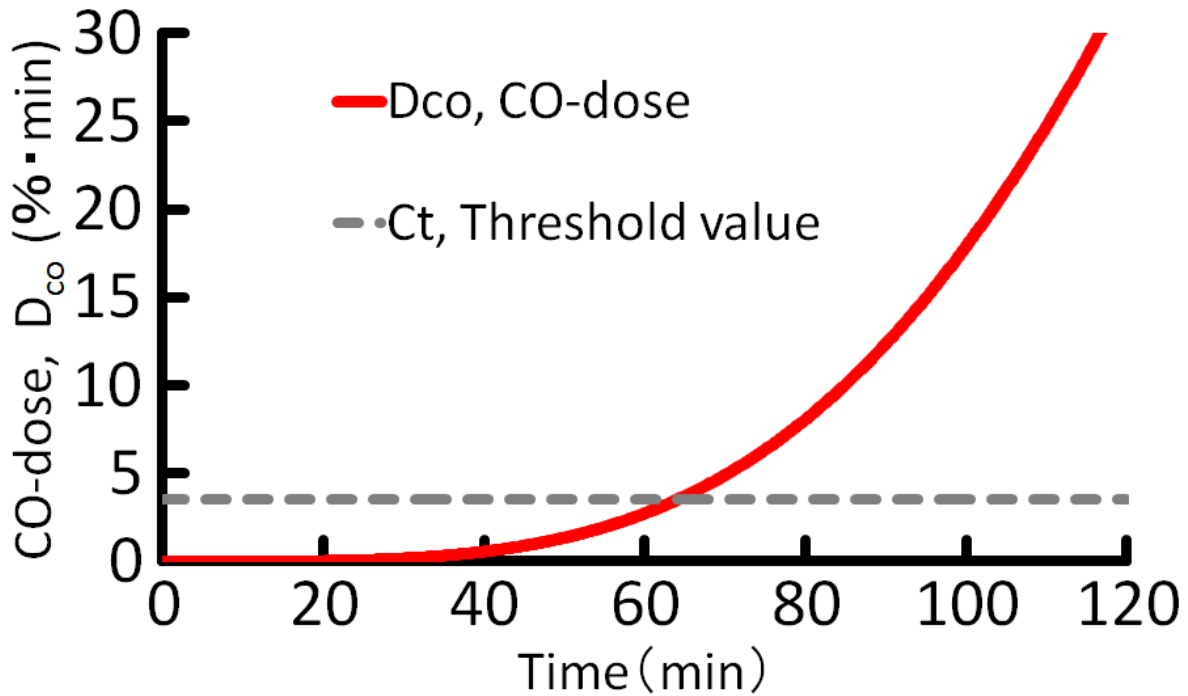


図 4.6 くん焼時、一酸化炭素暴露量の時間変化

これは、COヘモグロビン濃度が約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、くん焼が火災に成長する前に、自力非難不可能な状態に陥っているというケースが予想される。

考察

これらの計算結果は、6畳間における布団の燻焼という、一つの典型的な例を示したものである。部屋の広さが異なれば、CO 濃度変化のようすも変化する。燃焼物や換気条件の違いによっても、当然結果は変化する。しかしながら、典型的な条件で、1時間程度の時間で許容限界値を超えると
いう結果は、燻焼火災の危険性を表しているといえる。

すなわち、睡眠中の1時間というのは決して長い時間ではなく、熟睡したまま気づかずに意識を失って、そのまま燻焼火災により発生したCO を吸い続けて死に至る可能性は十分考え得るということである。

4.2. 拡大火災時に予想される一酸化炭素濃度予測

くん焼火災と同様に、**図 4.7** 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(\dot{Q}_f)は**図 4.8** のように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 kJ/s とする(式(4))。その後の Equivalence Ratio (Φ)は 1.0、CO イールドは**図 4.9** のように徐々に増加して 60 秒後に 0.2 の一定値になるとして計算を行う。

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

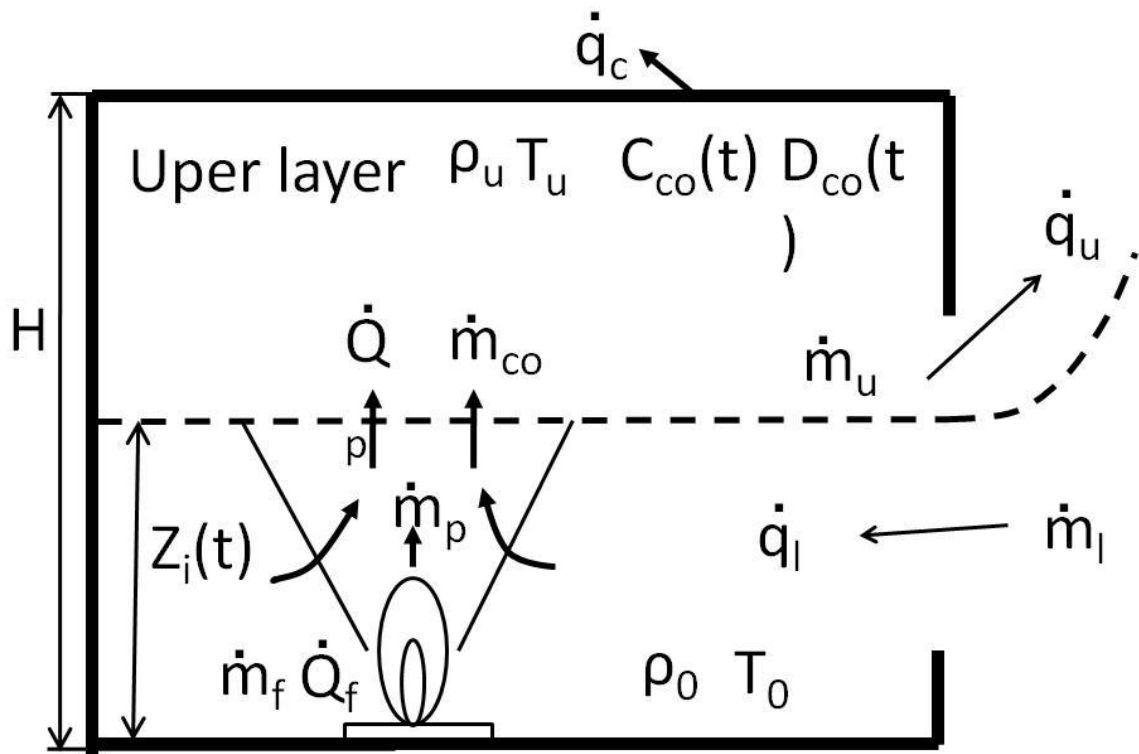


図 4.7 拡大火災時、計算モデルの模式図

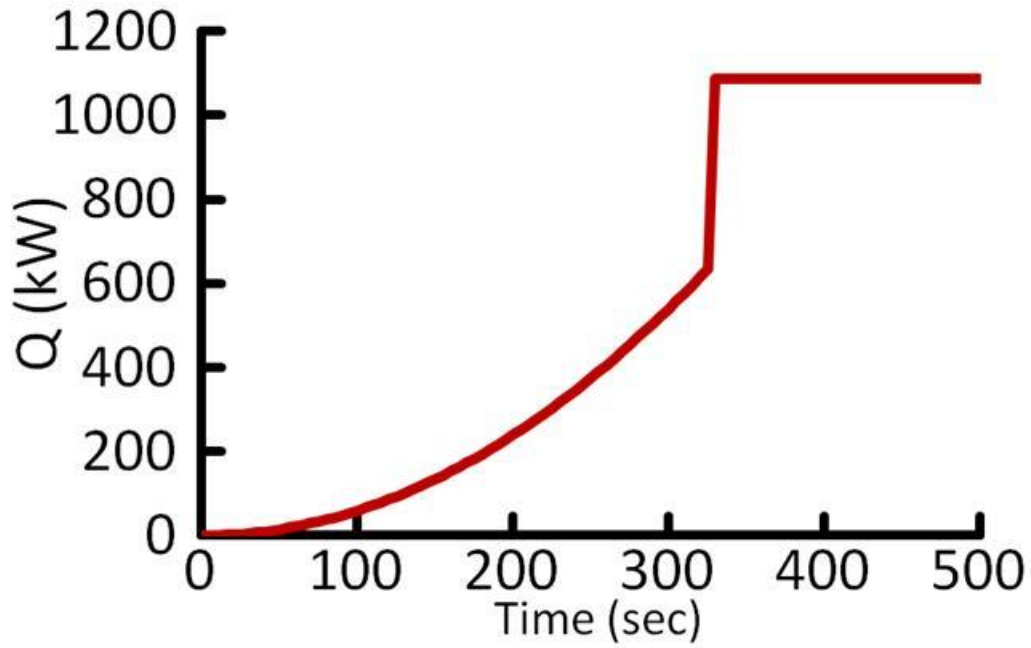


図 4.8 拡大火災時、発熱速度時間変化

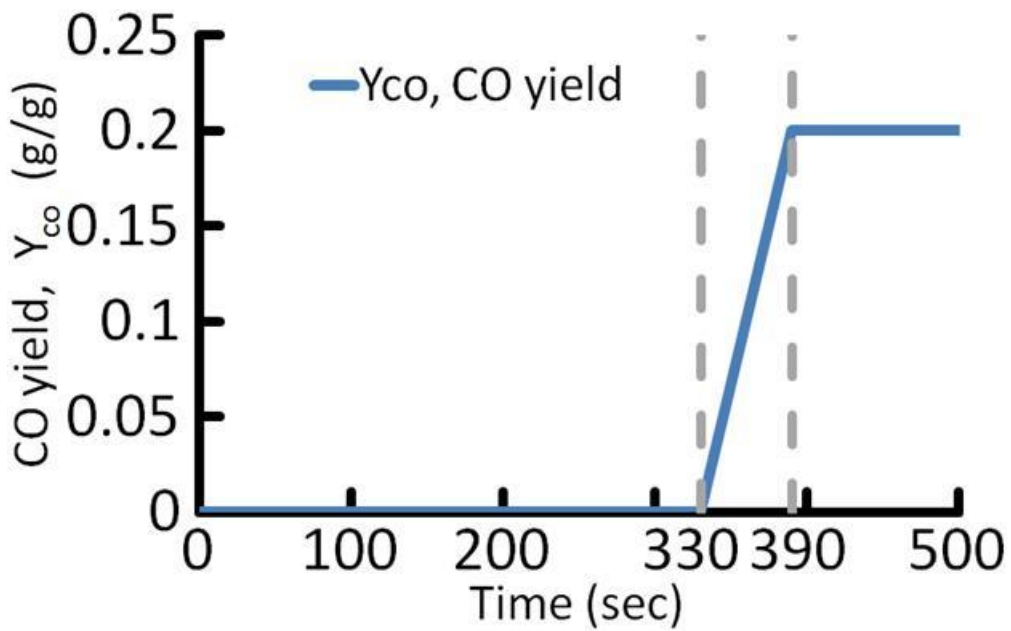


図 4.9 拡大火災時、CO イールド時間変化

計算条件は、若月^[12]らの実験に合わせて図 4.10 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。

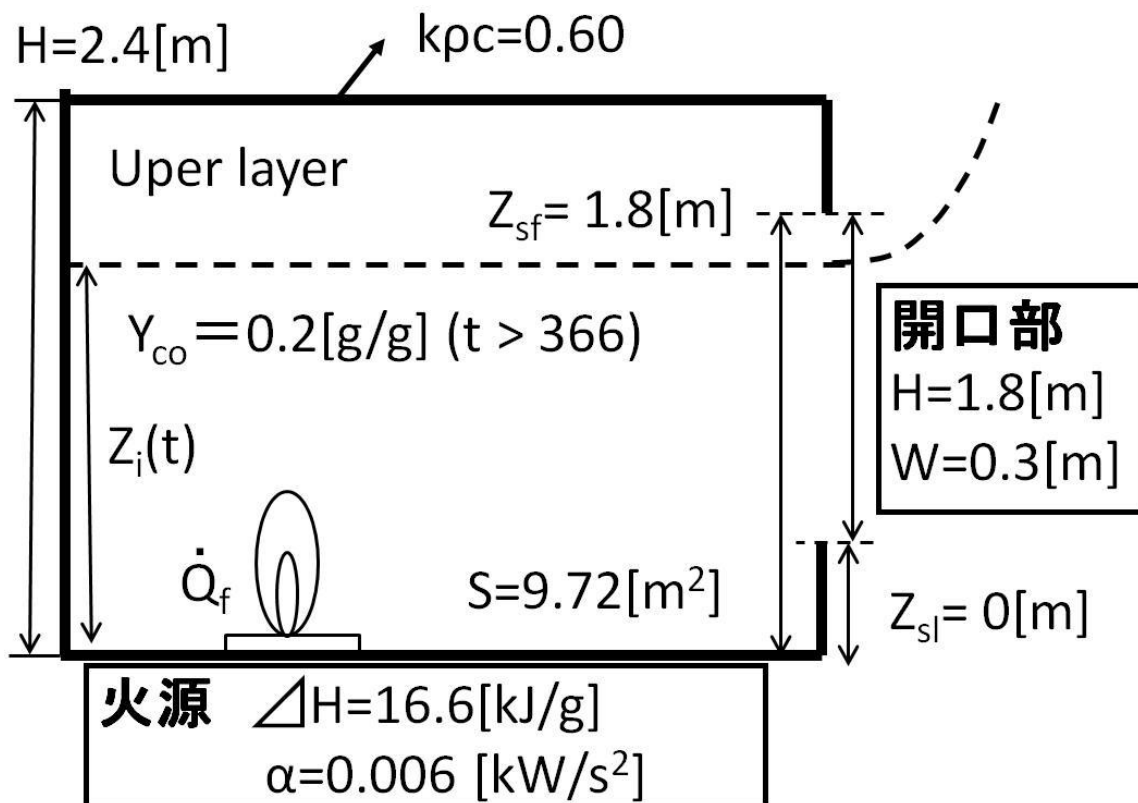


図4.10 拡大火災時の時の計算条件

予測結果を以下に示す。図4.11は煙層内の一酸化炭素濃度の時間変化を示したものある。フラッシュオーバー後、一酸化炭素濃度は一気に上昇し4.5%に達するという予測結果になった。

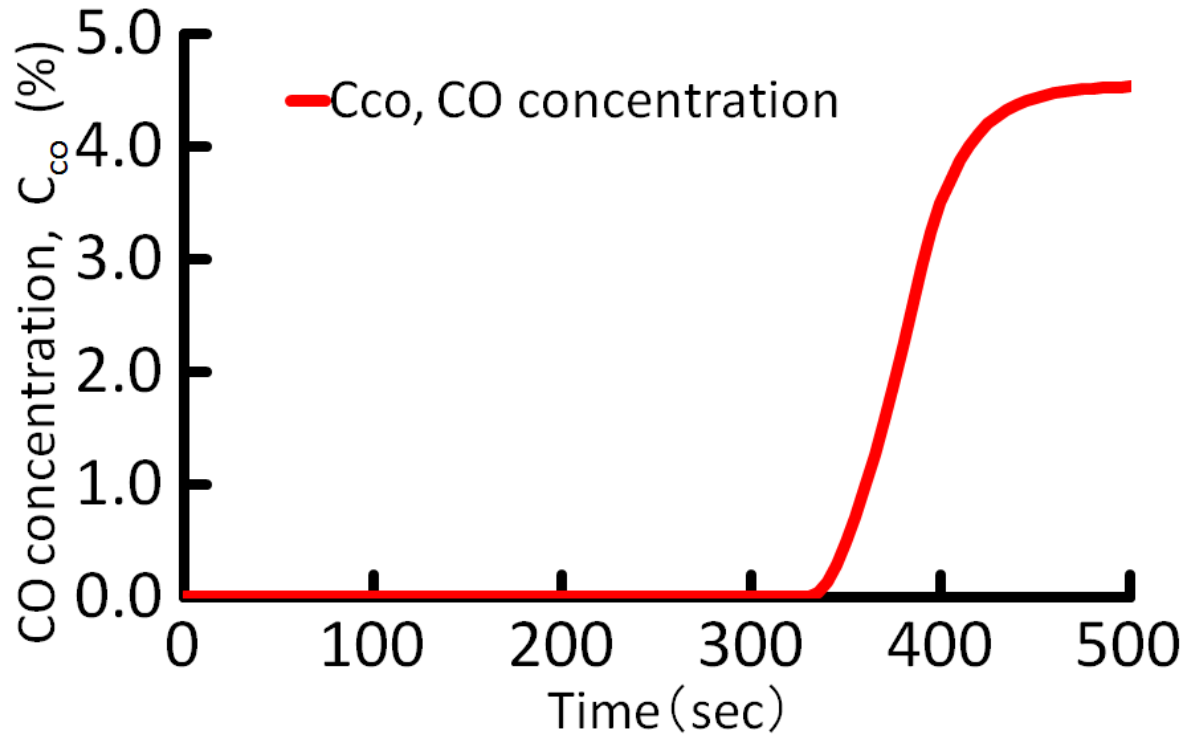


図 4.11 拡大火災時、煙層中の一酸化炭素濃度変化

図 4.12 は煙層内の一酸化炭素濃度の時間変化を示したものである。一酸化炭素濃度の上昇に伴い、モデル内の一酸化炭素暴露量も急激に増加し、440 s 後に許容限界値を超える。

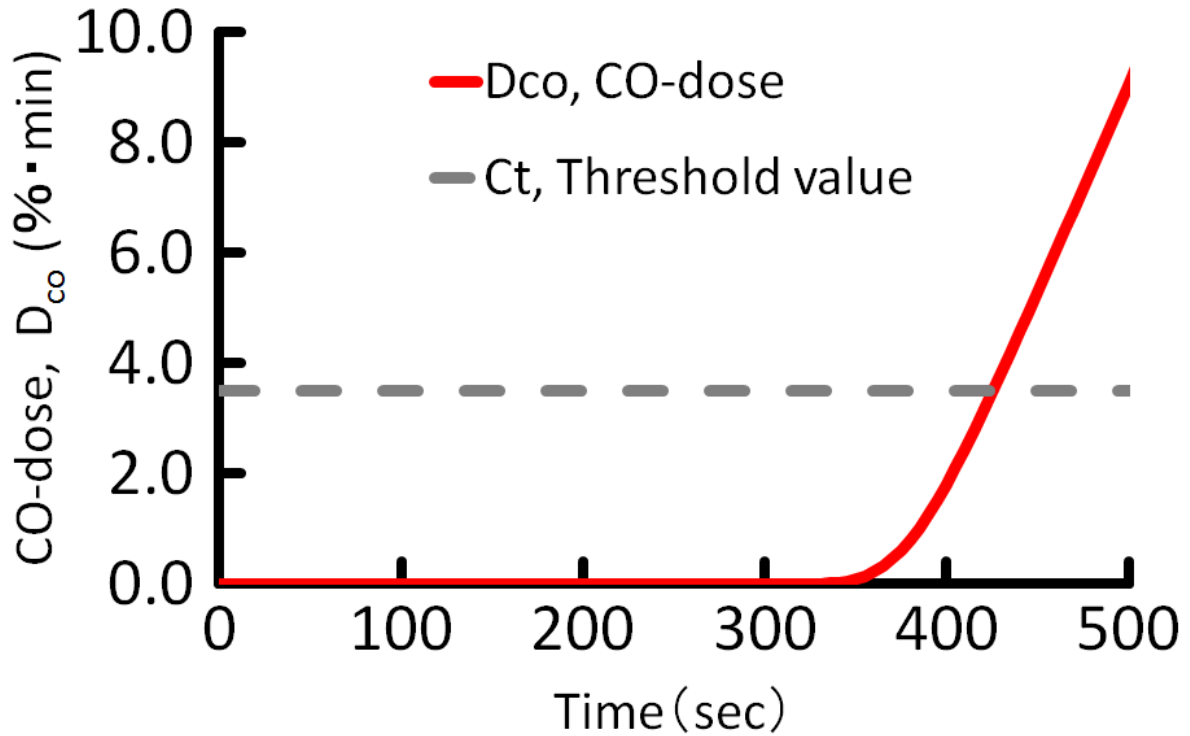


図 4.12 拡大火災時、一酸化炭素暴露量時間変化

第5章 考察

5.1. くん焼火災の危険性について

標準的な広さの部屋で布団のくん焼が拡大すると一時間程度の時間で身体能力が失われる程度の暴露量に達する。そのため、死者発生につながる可能性の高いシナリオとして認識する必要がある。

5.2. フラッシュオーバー火災の危険性について

フラッシュオーバーが起き、換気支配型の燃焼に移行すると急激に一酸化炭素濃度が上昇する。その濃度は低く見積もっても数%のオーダーであり、避難路が汚染されると直ちに避難が困難となると考えられる。そのため、フラッシュオーバーに至る前に避難を完了させる必要がある。

第 6 章 総括

6.1. 本論の要約とまとめ

実際の火災の環境に近い計算条件で、一酸化炭素の予測計算を行った。そして、典型的な条件で1時間程度のくん焼やフラッシュオーバーからものの1分ほどの時間で許容限界値を超えるという結果に至った。この結果は、住宅火災における一酸化炭素ガスの危険性を十分に表していると言える。以上は簡易的な計算の結果なので、実験による検証が課題として残る。

参考

- [1] 総務省消防庁; 火災報告, (1991-2000).
- [2] 青山裕司; 住宅火災において出火から死者発生に至る経過の類型化に関する研究, (2012).
- [3] J. G. Quintiere; An analysis of smoldering fires in closed compartments and their hazard due to carbon monoxide, (1982).
- [4] 万本敦, 他; 住宅用火災警報器の火災感知性能を評価するための火災モデルに関する研究, 平成18年日本火災学会研究発表概要集, (2006).
- [5] S. J. Toner; Chemistry and Structure of Fire Plumes, (1987).
- [6] J. H. Morehart; “Species Produced in Fires Burning in Two-Layered and Homogeneous Vitiated Environments, NIST, (1990).
- [7] C. L. Beyler; Major Species Production by Diffusion Flames in a Two-layer Compartment Fire Environment, Fire Safety Journal,10, (1986).
- [8] D. T. Gottuk; Generation of Carbon Monoxide in Compartment Fires, (2003).
- [9] D. T. Gottuk and B. Y. Lattimer; Effect of Combustion Conditions on Species Production, Fire Dynamics, (2003).
- [10] W. M. Pitts; An Algorithm for Estimating Carbon Monoxide Formation in Enclosure Fires, NIST, (1997).
- [11] T. Tanaka and S. Yamada; BRI2002: TWO LAYER SMOKE TRANSPORT MODEL, Fire Science and Technology, vol. 23, No. 1, (Special Issue) (1994).
- [12] 若月薫, 他; 高齢者の生活実態を踏まえた火災の燃焼特性に関する研究, 消防研究センター, (2011).
- [13] 匂坂馨; 火災時における有毒ガスによる人体への影響に関する調査報告書, 日本火災学会研究発表概要集, (2000).
- [14] 平野敏右; スモルダリング(くん焼)-資料集-, 東京消防庁, (1989).
- [15] V. Babrauskas; Ignition Handbook, Fire Science Publishers, Society of Fire Protection Engineers, (2003).
- [16] 日本火災学会; 火災時における有毒ガスによる人体への影響に関する調査報告書, 日本火災学会研究発表概要集, (2000).
- [17] 平野敏右; スモルダリング(くん焼)-資料集-, 東京消防庁, (1989).
- [18] 東京防災指導協会; 新火災調査教本(第6巻), 東京消防庁, (2003).

- [19]成瀬友宏; 火災時に発生する有毒ガスおよびその評価方法に関する文献調査報告書, 日本火災学会, (2007).
- [20]D. T. Gottuk, R. J. Roby, C. L. Beyler; The Role of Temperature on Carbon Monoxide Production in Compartment Fires, Northern Ireland, (1995).
- [21]総務省消防庁; 消防白書, (2008).
- [22]総務省消防庁; 消防白書, (2011).
- [23]内閣府共生社会政策統括官; 高齢社会白書, (2011).