

燃焼生成ガスの毒性を考慮した建築物の 避難安全設計手法の開発

趙 玄 素

目次

第1章 序章

1.1 研究の背景	p.1
1.2 研究の目的	p.1
1.3 研究手法	p.2
1.4 研究の位置づけ	p.3
1.5 本論文の構成	p.4
参考文献.....	p.5

第2章 文献調査

2.1 有害性ガスが死因となる死者が出た火災事例.....	p.6
2.1.1 福山ホテル火災.....	p.6
2.1.2 サンタマリアナイトクラブ火災.....	p.7
2.1.3 神戸市内木造共同住宅火災	p.7
2.2 火災時の燃焼生成ガスの危険性について.....	p.7
2.2.1 一酸化炭素について.....	p.8
2.2.2 シアン化水素について.....	p.9
2.2.3 人体および避難への影響	p.10
2.3 技術の現状と課題	p.14
2.4 有害性ガスの発生を目的とする試験装置および各国の評価手法	p.14
2.4.1 密閉箱型試験.....	p.15
2.4.2 フロースルー型試験.....	p.16
2.5 スケールの異なる試験間の比較	p.18
2.5.1 ISO9705 のルーム試験と ISO19700 の比較.....	p.18
参考文献.....	p.20

第3章 ガス有害性試験の代替手法

3.1 ガス有害性試験について.....	p.21
3.2 実験概要	p.23
3.2.1 回転速度の測定.....	p.25
3.3 試験体	p.25
3.4 燃焼条件と燃焼生成物の関係	p.26
3.4.1 ガス成分分析結果	p.26
3.4.2 有害性ガス生成量と行動停止時間	p.34
3.4.3 マウスの行動	p.40

3.5 代替手法案の提案	p.47
3.6 代替手法案の妥当性について	p.48
3.7 回転速度と X_{FEC} の比較	p.50
3.8 まとめ	p.52
3.9 今後の課題	p.52
参考文献	p.53

第4章 燃焼条件と燃焼生成物の関係

4.1 ISO チューブ炉試験について	p.55
4.1.1 実験概要	p.56
4.1.2 実験結果	p.63
4.1.3 毒性評価	p.79
4.1.4 燃焼条件と燃焼生成物の関係	p.85
4.1.5 チューブ炉の加熱条件と燃焼温度	p.88
4.2 簡略チューブ炉	p.72
4.2.1 実験概要	p.92
4.2.2 実験結果	p.94
4.3 チューブ炉の比較	p.104
4.3.1 CO/CO ₂ 比較	p.104
4.3.2 当量比比較	p.107
4.4 まとめ・今後の課題	p.108
参考文献	p.109

第5章 成分分析に基づくガス有害性試験の代替手法

5.1 代替手法の提案	p.111
5.2 刺激性ガスが歩行速度に与える影響	p.114
5.2.1 減光係数と歩行速度の関係	p.114
5.2.2 SDC 試験による減光係数と XFEC の関係	p.115
5.3 避難安全設計の検証例	p.118
5.3.1 対象建築物	p.118
5.3.2 既往手法による避難安全検証	p.119
5.3.3 有害性ガスの影響を考慮した避難安全検証	p.122
5.4 まとめ・今後の課題	p.127
参考文献	p.128

第6章 まとめと今後の課題

6.1 まとめ p.129

6.2 今後の課題・展望..... p.131

付録 1..... p.133

付録 2..... p.147

謝辞..... p.151

第一章 序論

1.1 研究背景

火災時避難者にとって火炎よりも煙やそれに含まれる有害性ガスがより脅威な存在である。煙や有害性ガスは火炎よりも速いスピードで拡散し、避難者に心理的および生理的影響を与える恐れがある。

煙から避難者を守るために現在避難安全検証法が日本の法律に定められており、避難安全検証法は二層ゾーンモデルに基づき、火災が起きた際に発生する煙によって在館者が安全に避難できなくなるまでの時間を定められた式によって算出し、避難者の歩行時間と比較して、検証を行う。しかし、有害性ガスと煙の拡散濃度が異なり、拡散速度は粒子密度に依存するため、有害性ガスが煙より早く拡散する可能性があることから、煙降下時間より前に避難者が有害性ガスを吸う危険性が考えられる。従って、有害性ガスの影響を考慮した避難安全設計がより安全性の高いものである。

有害性ガスが原因と考えられる火災事例が日本および海外で多数報告されている。代表的な火災事例として、2012年の福山ホテル火災、2013年のブラジルのリオグランデ・ド・スル州サンタマリアナイトクラブ火災、神戸市内木造共同住宅火災が挙げられる。福山ホテル火災では事故原因の特定に至らなかったが、7名の死因が一酸化酸素中毒であった。サンタマリアナイトクラブ火災では、天井材のポリウレタンフォームからシアン化ガスが発生し、死者239名、負傷者169人と甚大な被害があった。また、神戸市内木造共同住宅火災では、火元の火災室から2軒離れた部屋で煙を確認できない状況下で死亡者が生じた。これらの火災事例から、火災時に発生する有害性ガスは煙よりも早く拡散する可能性があり、避難者にとって大きな危険要因であることが示唆された²⁾³⁾⁴⁾。

以上のことから、現行の避難安全検証手法では有害性ガスの影響が考慮されておらず、火災時に生成する有害性ガスが避難者に与える影響を評価し、有害性ガスの影響を考慮した避難安全設計手法の提案はより安全な避難行動を可能にするために極めて重要である。

現在日本において、有害性ガスの危険性は、材料の観点からガス有害性試験によって評価されている。ガス有害性試験はマウスを使った動物試験であり、燃焼試験により発生した有害性ガスに暴露したマウスの行動停止時間によって、材料の可否を決定するものである。動物実験であることから、建築材料固有の分解・燃焼生成ガスの定量分析が出来ず、生成ガスの有害・有毒性の個別評価が難しいことから、避難安全設計を行う際に評価する有害性ガスの影響を測ることができず、避難者に与える影響を定量的に評価することが難しい。従って、ガス成分分析を用いたガス有害性試験の代替手法が求められている。また、動物愛護の観点からもマウスを使わない代替試験法の提案が求められている。

1.2 研究目的

本研究では、有害性ガスの影響を考慮した避難安全設計を可能とするため、二つのことを目的とした。一つ目は動物実験に替わる成分分析に基づくガス有害性試験の代替手法の提案、二つ目は実火災空間における有害性ガスの影響を考慮した火災避難安全設計手法の提案である。本研究のフローを図 1.1.1 に示し、提案する火災避難安全設計手法のフローを図 1.1.2 に示す。

1.3 研究手法

本研究では、以上の目標を達成するために、以下の3つの課題について詳しく検討する。

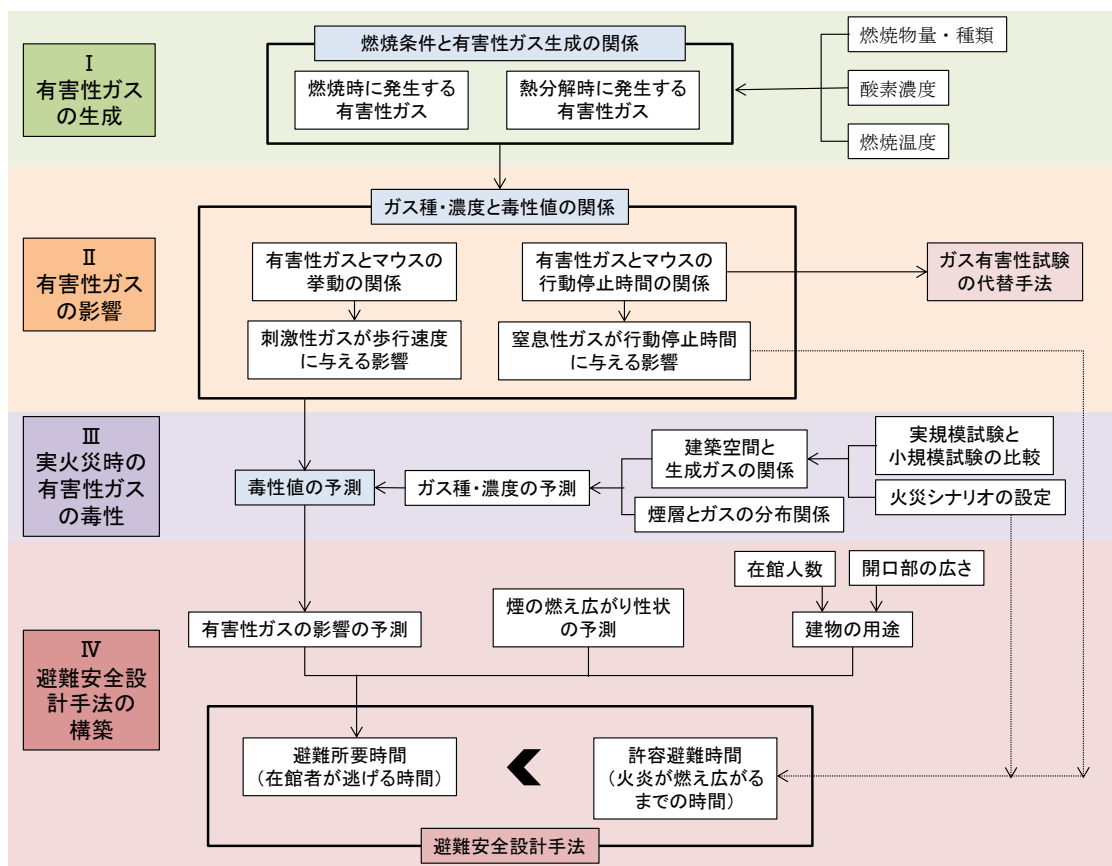


図 1.1.1 研究のフロー図

1. 有害性ガスの生成と燃焼条件の関係の検討

チューブ炉（IS019700）を用いて燃焼実験を行い、燃焼時および熱分解時にそれぞれ発生する有害性ガスの各種の濃度を加熱温度や酸素濃度と比較し、燃焼条件と有害性ガスの生成の関係を調べ、実火災時の火災進展段階それぞれの毒性値を評価する。

2. 有害性ガスが人間の避難行動に与える影響の検討

人間とマウスの挙動の関係性を考慮しながら有害性ガスの刺激性ガスが歩行速度に与える影響および窒息性ガスが行動停止時間に与える影響をそれぞれ明らかにし、有害性ガス

とマウスの挙動の関係および行動停止時間の関係についてそれぞれ検討を行う。有害性ガスがマウスに与える影響はガス有害性試験装置を用いて行い、ガス有害性試験の代替手法を提案する

3. 有害性ガスの影響を考慮した避難安全設計手法の構築

現行の避難安全設計手法を基本とし、歩行者速度について有害性ガスが避難者に与えられる影響を対し、刺激性ガスおよび窒息性ガス両方の影響を考慮した設計式を提案する。

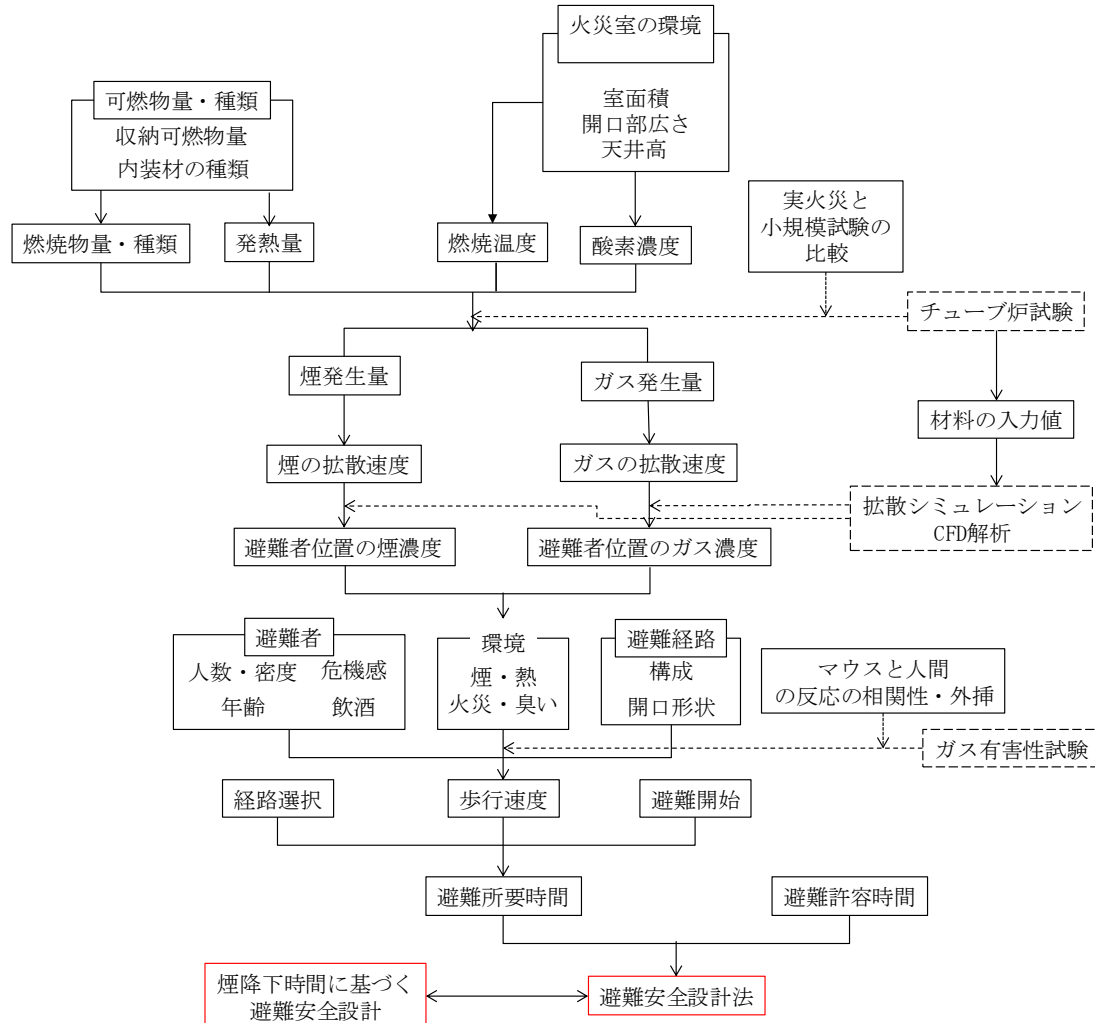


図 1.1.2 火災避難安全設計手法のフロー図

1.4 研究の位置づけ

本研究は、既存の火災避難安全設計手法に対し、有害性ガスの影響への考慮を加えた設計法の提案である。有害性ガスの影響をガス成分分析から評価することは実務的にはいくつもの技術的および時間的難点が存在するが、実際に火災の際に生じた有害性ガスが避難者に与える影響を直接評価する研究はまだ少なく、ガス成分分析がまだ難しかった時代の評価方法が用いられ続けている。本研究は、火災避難安全設計するために、成分分析技術が

発展向上した今の時代に可能な手法を用い、火災時の有害性ガスの避難経路に生成濃度を予測し、避難者が受ける影響を歩行速度から評価するというアプローチを取っている。

1.5 本論文の構成

本研究は、全章で構成され、各章の概要は次に述べるとおりである。

第 1 章 序論

第 1 章では、本研究の背景および目的、本論文の構成を述べる。

第 2 章 既往研究の文献調査

第 2 章の文献調査では、ガス有害性の評価に 관련된 国際規格をまとめ、各国の火災時に発生する有害性ガスの評価方法を整理する。また、有害性ガスが人体に与える影響についてまとめる。

第 3 章 ガス有害性試験の代替手法

第 3 章ではガス成分分析を使って有害性ガスの評価を行い、ガス有害性試験の代替手法を提案する。ガス有害性試験装置を使って行った実験のガス成分分析結果から毒性値を計算し、マウスの行動停止時間と比較を行い、両者の相関関係について調べ、有害性ガス影響をガス成分分析によって評価する妥当な手法を提案する。

第 4 章 燃焼条件と燃焼生成物の関係

第 4 章では、燃焼条件と燃焼生成物の関係を明らかにする。チューブ炉試験装置を使って加熱温度と空気供給量を変えながら実験を行い、試験体の燃焼温度と生成する有害性ガスの濃度および種類を調べる。チューブ炉試験は加熱中炉内の温度を計測できないため、試験体の燃焼速度から時間に対する燃焼区間を求め、燃焼区間の雰囲気温度を仮定し、試験体の発熱量やチューブ炉内の流速から移流による熱移動を求め、チューブ炉の出口温度値をシミュレーションで求める。測定した出口温度の値と比較し、仮定した雰囲気温度の妥当性を検討する。さらに、簡略チューブ炉試験を行い、ISO チューブ炉と比較を行い、両試験の互換性について検討した。

第 5 章 火災避難安全設計手法

第 5 章では有害性ガスの窒息性影響および刺激性影響を考慮した火災避難安全設計手法を提案する。

第 6 章 まとめ

第 6 章では、まとめとして本研究の成果および今後の課題について総括して述べる。

参考文献

- 1) 小島正臣: 煙およびガス拡散と避難上の安全距離に関する研究, 消防科学研究報 10 号, 昭和 48 年
- 2) 火災の原因調査結果 (広島県福山市ホテル火災) の公表, 平成 25 年 5 月 28 日, 消防庁
- 3) William L. Grosshandler, Nelson P. Bryner, Daniel M. Madrzykowski, K Kuntz: Report of the Technical Investigation of The Station Nightclub Fire (NIST NCSTAR 2), Volume 1, June 30, 2005
- 4) 上村雄二、塩谷俊行、谷池史章, 火元から離れた場所で死者が発生した火災の調査報告, 火災, 348 Vol.67 No.3, 2017 年 6 月

第2章 文献調査

2.1 有害性ガスが死因となる死者が出た火災事例

総務省消防庁による火災報告から、平成28年中の建物火災の死者数に対する建物別および死因別の死者発生状況を図2.1.1-2に示す¹⁾。

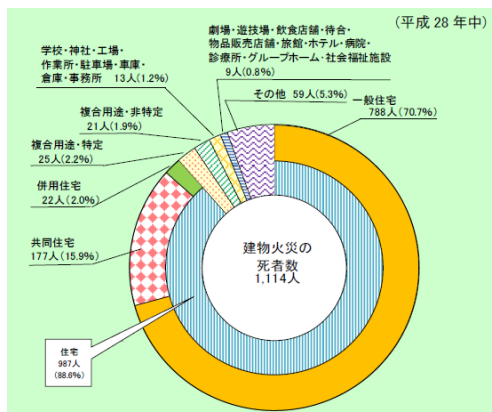


図 2.1.1 建物用途別の死者発生状況

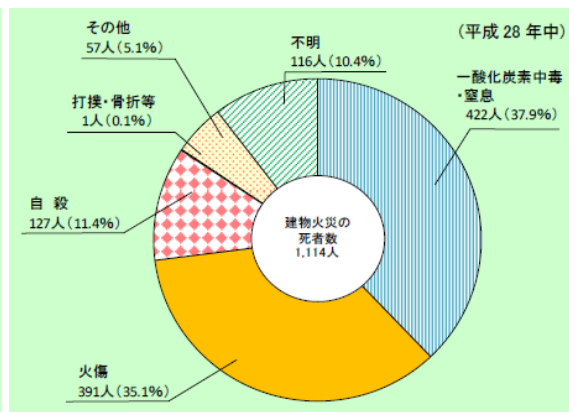


図 2.1.2 建物死因別死者発生状況

図2.1.1から、住宅（一般住宅、共同住宅及び併用住宅をいう）での死者が987人であり、建物火災による死者の88.6%を占めている。また、死因別では一酸化炭素中毒・窒息による死者が37.9%であり、最も多くなっている。

出火原因については、放火のに次いでたばこが多く²⁾、「ふとん」に着火した「寝たばこ」による火災の死者をたばこが火源となった火災と比較すると、平均血中CO-Hb飽和度では1.5倍、平均血中HCN濃度では2倍、総合毒性指数では1.59倍も高い数値を示している。また、有害性ガスの濃度を調べた際、一般住宅火災での死者の実態から致死量を超えた事例が10.2%に見出された³⁾。これらは、日常の生活環境の中にウレタン、アクリル樹脂などの含窒素系合成樹脂素材が浸透したことによるものであると考えられる。

一方、建築基準法では一定の規模以上の建築物に避難安全設計の必要を課しており、防排煙設備や消防設備をの設置や避難計画を講じることにより、火災時の火災および煙によるリスクは大きく低下している。しかし、古い建物や法的に不備のある建築施設を中心に依然として国内外で有害性ガスによる死者が生じており、その事例を紹介する。

2.1.1 福山ホテル火災

2012年の広島県福山市で起きた福山ホテル火災は7名死亡（男性3名、女性4名）、負傷者3名（女性3名）であった。事故原因は電気配線、電気機械、たばこなど特定に至らず、

死傷者発生原因として、耐火構造ではなかったことや、上階に延焼して燃え抜けたこと、消火器による消火活動が行われていなかったこと、自動火災報知機の作動の遅れなどが考えられ、死者の死因の全てが一酸化炭素中毒であった。消防庁によって、再現実験が行わ

れ、煙のまわり方などが再現され、研究がなされた⁴⁾。

2.1.2 サンタマリアナイトクラブ火災

2013 年のブラジルのリオグランデ・ド・スル州のサンタマリアで起きたナイトクラブ火災は、死者 239 名、負傷者 169 人であった。出火原因は演出用の花火の違法使用であり、被害が拡大した原因は防音材として天井材のポリウレタンフォームからシアン化ガス発生したためであった。州消防署は、建物の非常口が不十分で、花火の使用権限もなかったことを認識していたがクラブに営業許可を出していた。許可証には、出口が 2 か所あるように記されていた。虚偽の申告を基に許可が出されたことについて、消防署や市当局の監督責任が問われている⁵⁾。

2.1.3 神戸市内木造共同住宅火災

2017 年、神戸市内で起きた木造共同住宅は死者 2 名であったが、死者がいた B 号室に煙を確認できなかったという近隣の証言があり、煙を目視できない状況下で死亡者が生じたことから、有害性ガスが火災時の大きな危険要因であることが示唆された。図 2.1.3 に住宅の配置図を示す。

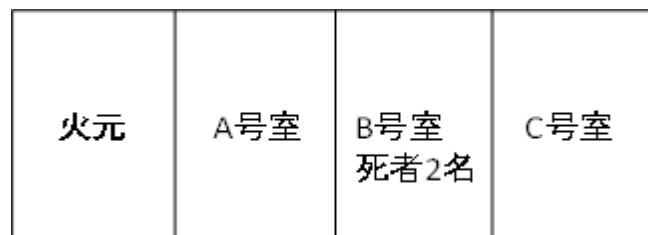


図 2.1.3 木造共同住宅配置図

神戸消防署はミニチュア模型による再現を行い、フラッシュオーバー前後から一酸化炭素濃度が急激上昇し、煙を視認できない状態でも一酸化炭素濃度が上昇することや、小屋裏に滞留した煙は天井板の隙間から部屋の内壁を伝い、垂れ下がるように流入することを確認した⁶⁾。

2.2 火災時の燃焼生成ガスの危険性について

火災時の燃焼生成ガスの内、人体に大きく影響を及ぼすのは以下の 10 種類とされている⁸⁾。

一酸化炭素、シアン化水素、一酸化窒素、二酸化窒素、二酸化硫黄、塩化水素、臭化水素、フッ化水素、ホルムアルデヒド (CO, HCN, NO, NO₂, SO₂, HCl, HBr, HF, CH₂O, C₃H₄O) 一酸化炭素やシアン化水素は窒息性影響を持ち、人体の血液中の酸素と結び付き、呼吸停止に至らせる。他の有害性ガスについては、刺激性影響を持ち、人の目や鼻などの粘膜に作用し、通常の歩行速度を遅らせることが考えられる。シアン化水素や一酸化炭素の影響については多くの研究や実験がなされている。

また、二酸化炭素については、直接的な毒性はないが、空気中における濃度が上がるにつれ、避難者の呼吸頻度が上がり、結果としてより多くの有害性ガスを吸入することが考えられるため、考慮する必要がある。

2.2.1 一酸化炭素について

一酸化炭素による中毒には急性中毒と慢性中毒がある。急性中毒は比較的大量の CO ガスを短時間内に吸引し、それがヘモグロビン (Hb) と結びついて細胞への酸素補給を障害し、組織、臓器不全を来たすものである。慢性中毒は少量の CO ガスを長期間継続的に、或いは軽い急性中毒によって生じる臓器不全である。火災による一酸化中毒は急性のものがほとんどである⁹⁾。表 2.2.1 に血中ヘモグロビン濃度と中毒症状の関係を示す¹⁰⁾。

表 2.2.1 血中一酸化炭素ヘモグロビン濃度と中毒症状

COHb (%)	中毒症状
0～10	なし (喫煙者は 5～10%)
10～20	軽い頭痛、額の圧迫感
20～30	頭痛、側頭部の拍動
30～40	激しい頭痛、視力低下、悪心、嘔吐
40～50	上記症状に加え、頻脈、呼吸数の増加、運動麻痺
50～60	意識消失、チェーンストーク呼吸、痙攣、昏睡、時に死亡
60～70	心拍と呼吸の減弱、昏睡
70～	呼吸停止、死亡

一酸化炭素は酸素に比べて Hb との親和性が強い。CO と結びついた Hb (COHb) は酸素を運搬できなかり、酸素の無酸素状態を来たすのが CO による主要な毒性機序である。一般的に COHb 濃度が 5% 以上超えると視力障害、聴力障害、見当識障害が出現するとされている。吸気中の CO 濃度と中毒症状の関係については①0.01%→無症状②0.05%→1 時間の吸引で軽度発症③0.1%→1 時間で死亡例が発生④0.4%→数分後で即死に近い死亡例が発生している。

また、間欠型 CO 中毒となり、一度回復しても 2~4 週間 (遅いときは 5~6 週間) に突然の精神神経症状が出現することがある。失見当識、錯乱、不穏、行動以上、失語症、パーキンソン様症状などである。CO 中毒全体の 10% くらいに発生し、3~4 間くらいで快方に向かうが、そうでない例もある。

一酸化炭素中毒死と死因を確定した検体の剖検結果、気管支上皮に顕著な杯細胞の増生・腫大することで、気管支内腔が相対的に狭くなっていることが認められた。それは、熱風を吸入することが気管支上皮において杯細胞が増大・腫大する原因の一つであり、短時間で起こる可能性があることを示している。杯細胞の生成は、熱や一酸化炭素の曝露による影響などと考えられ、生体防御反応の一種とみることができる。一般的な気管支喘息疾患における杯細胞の生成速度に比べると非常に速いものであり、そのメカニズムはまだ明らかになっていない¹¹⁾。

火災による死者の死因の区分は、血液中的一酸化炭素・ヘモグロビン (以下「CO-Hb」) 飽和度の目安として、“CO-Hb 飽和度 60% 以上”である場合は死亡する前に CO ガスを相当

量吸入して死亡した「CO 中毒死」と判断し、10%以下の場合は煙を吸入した内に「火傷死」と判断し、その中間の CO-Hb 飽和度を CO 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場合は「焼死」と区分している¹²⁾。

2.2.2 シアン化水素について¹³⁾

「シアン化水素(HCN)」は別名青酸ガスとも言われ、血液中で酸化酵素の鉄分子と結合して酸素の活性作用を阻害する。血液中の青酸ガス濃度(血中 HCN 濃度)の致死量 2.7 μ g/ml、中毒量は 1.35 μ g/ml と言われている。表 2.2.2 にシアン化水素ガス濃度と中毒症状を示す。

表 2.2.2 シアン化水素ガス濃度と中毒症状

HCN濃度 (ppm)	中毒症状
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分で死亡
181	10分で死亡
271	即死

(東京消防庁消防科学研究所監修「火と煙と有毒ガス」P123より抜粋)

火災において、塩化水素などのハロゲン系ガスおよびシアン化水素が発生する際は、必ず一酸化炭素も発生する。火災による死因の生理学的検討結果報告書による調査した火災事例 108 件中、血中青酸濃度が 0 以外の対象事例が 87 例みられ、火災時の青酸ガスによる影響が一般化している。血中青酸濃度が中毒量以上では CO 中毒死の発生率が高くなっている。CO 中毒死に区分されているが、青酸致死量以上が 11 人発生しており、その中の何人かは青酸ガス中毒死あるいは一酸化炭素中毒との相乗効果により死亡したものと考えられる。それぞれの致死量の交点を結ぶ「毒性等価直線」を引くと HCN が CO-Hb に比べて強く影響している事例が 20 例もある(図 2.2.3)。特に CO-Hb 未満で HCN 致死量以上の 7 例は、CO ガスの吸入に比べ青酸ガスの影響が強く、死に至った第一義的要因は青酸ガス中毒であったと推定される。

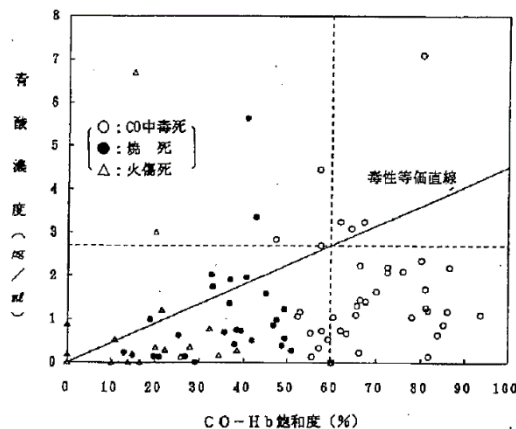


図 2.2.3 CO-Hb 濃度と HCN 濃度の散布図

2.2.3 人体および避難への影響

有害性ガスの人体及び避難への影響を評価する方法の対象は急性吸入毒性に限る。建築材料の燃焼生成物の有害性を評価するためには、大別すると次の二つの方法がある¹⁴⁾。

- (1) 燃焼生成物のガス分析試験により成分ガスの種類と量を明らかにし、各成分ガスに関して既に明らかにされている情報を総合して生成物全体の有毒性を評価する方法。
- (2) 実験動物に材料の燃焼生成物を吸入させて動物が呈した症状によってその有毒性を評価する方法。

(1) がもっとも合理的であることは明らかなが、火災時に材料が燃焼・熱分解して発生する成分ガスは多岐にわたり、すべてを分析して毒性評価することは難しかった。現在では日本では動物実験データを用いた評価法が主流となっている。(2) においては、症状を発生させる量の定量化が必要。通常毒物学では LD₅₀ という概念が用いられる。これは吸入物質等の致死量であり、致死となる要領の統計学平均値を指す。

毒性モデルとして、ISO13344 および ISO13571 がある。

2.2.3.1 ISO13344 火災生成物の致死毒性効力の評価¹⁵⁾

ISO13344 では火災時の空気中の有害性ガスの毒性効力を評価している。毒性の評価は以下のことに依存する

1. 選択された火災モデル
2. 暴露シナリオ
3. 材料の評価

30 分間暴露されたラットと関連付けられた火災による致死的毒性の評価は、燃焼時に生じる CO, CO₂, O₂ の大気中の分析データを計算して行う。存在するときは、HCN, HCl, HF, SO₂, NO₂, acrolein, formaldehyde も計算する。火災による毒性効力が毒性物分析に関連付けられないなら、ほかの毒性物が存在すると考えられる。

致死毒性度 L_{FED} について式(1)(2)の 2 つの式が提案されている。表 2.2.4 に LC₅₀ の値を示す。LC₅₀ はラットを 30 分間暴露し、半数が行動停止に至る濃度であり、ISO13344 の毒性モデルは動物実験の結果からの各成分種に対する相対評価であると考えられる。式(1)は酸素欠乏を第一項によって考慮に入れており、NIST の N-Gas モデルを用いている。

「N-Gas」計算を用いた平均 FED 値は、試験動物の半数が死亡した値が 1.07 であった。信頼区間は 0.25 である。

式(3)に用いられる値と式(2)が異なり、同じ入力値に対して異なる毒性値を示す。式(3)には信頼区間が示されていない。

Levin らによる式

$$L_{FED} = \frac{m[CO]}{[CO_2] - b} + \frac{21 - [O_2]}{21 - LC_{50, O_2}} + \frac{[HCN]}{LC_{50, HCN}} + \frac{[HCL]}{LC_{50, HCL}} \quad \dots \text{式(1)}$$

$LC_{50, X}$: 30 分間曝露した際に実験動物の半分が死亡するガス X の濃度

m: CO-CO₂ グラフの傾き

b: CO-CO₂ グラフの切片(ppm)

Purser による式

$$L_{FED} = \left(\frac{[CO]}{LC_{50, CO}} + \frac{[HCN]}{LC_{50, HCN}} + \frac{[X]}{LC_{50, X}} + \frac{[Y]}{LC_{50, Y}} \right) \times V_{CO_2} + Z_A + \frac{21 - [O_2]}{21 - 5.4} \quad \dots \text{式(2)}$$

X: 酸性ガス(ppm)

Y: 有機刺激性ガス(ppm)

V_{CO_2} : CO₂ に関わる係数($=1 + e^{0.14 \times CO_2 \cdot 1/2}$)

表 2.2.4 ラットによる 30 分間曝露の LC₅₀

Fire effluent gas	30-min LC ₅₀ μl/l
CO	5 700
HCN	165
HCl	3 800
HBr	3 800
HF	2 900
SO ₂	1 400
NO ₂	170
Acrolein	150
Formaldehyde	750

L_{FED} の式は以下の式に基づき、数学的に求められている。基準となる値はラットを一般的な火災ガスに単独でまたは組み合わせて曝露する広範な実験に基づく。

$$L_{FED} = \sum_{i=1}^n \int_0^t \frac{C_i}{(C \cdot t)_i} dt$$

C_i は毒性ガスの濃度

$C_i \cdot t$ は毒物学的作用をもたらすために必要とされる特別な曝露量に対する、1 リットルあたりのマイクロリットルで表した濃度 - 時間積である

基準値は 30 分間マウスが曝露された時に半数が死ぬ濃度であるが、式により、30 分の時間値が数値的にキャンセルされると、 L_{FED} は致死ガスの平均濃度とその LC₅₀ 値の単純な比率になる。

従って、 L_{FED} は 30 分間の平均濃度の毒性値を評価したものであるが、本研究では、単位時間 20sec の瞬間値を代入して計算を行った。これは、瞬間曝露された際の毒性値を安全側に評価したものである。

2.2.3.2 ISO13571

ISO13571 では有効曝露量率 X_{FED} 、および有効濃度率 X_{FEC} の考え方に基づいて毒性モデルを提案し、それぞれ有害ガスの窒息性影響と刺激性影響を評価したものである。

【窒息性影響】

暴露した人間の暴露時間や吸収線量によって評価する。また、CO と HCN のみが窒息性ガスとして取り扱われている。有効曝露量率 X_{FED} (Fractional Effective Dose sue to toxicity)は時間区分ごとに各窒息性成分について求める。その評価式は式(1)である。CO および HCN の濃度は $\mu\text{l/l}$ で表し、 CO_2 は体積百分率で表している。不確かさは 35%前後と推測されている。

35000min/ $\mu\text{l/l}$ の用量は、平均成人体重および 20l /分の呼吸分容積を有するヒトにおいて約 30%の血液カルボキシヘモグロビン飽和を生じる値である。

HCN の脆弱性は、定数として表現することはできないため、指数表現を用いており、カニクイザルからのデータとげっ歯類のデータに基づいて、より高い濃度およびより低い濃度への外挿のために修正された曲線の形状である。その結果は、人間の反応傾向と一致している。

典型的な火災において、CO と HCN のみが許容避難時間に重要な影響を及ぼす窒息性燃焼生成ガスであるとされている。また、酸素濃度が低下することにより、窒息性を示すことがあるが、酸素濃度が 13%以下に低下しない限り考慮する必要はない。

$$X_{FED} = \sum_{t_1}^{t_2} \frac{[CO] \cdot v_{CO_2}}{35000} \Delta t + \sum_{t_1}^{t_2} \frac{[HCN]^{2.36} \cdot v_{CO_2}}{1.2 \times 10^6} \Delta t \quad \dots \text{式(3)}$$

$$v_{CO_2} = e^{\frac{[CO_2]}{5}}$$

v_{CO_2} : 過呼吸を考慮した頻度係数(= $e^{[CO_2]/5}$)

Δt : 分で表される時間区分

X_{FED} は以下の式に基づき、数学的に求められている。これは、 L_{FED} と同じものだが、基準となる値が瞬間値であるため、 X_{FED} は窒息性ガスの影響を積算的に評価したものである。

$$X_{FED} = \sum_{i=1}^n \sum_{t_1}^{t_2} \frac{C_i}{(C \cdot t)_i} \Delta t$$

【刺激性影響】

知覚器官や上気道への刺激物の影響、またある程度の肺への影響は、刺激性ガスの濃度によって評価する。有効濃度率 X_{FEC} (Fractional Effective Concentration) は各時間区分における刺激性ガスについて求める X_{FEC} の総和が規定の閾値を超える時間が、その安全基準における避難時間を表す。その評価式は式(2)である。濃度は $\mu\text{l/l}$ で表している、不確かさは 50% 前後と推測されている。暴露初期において、刺激性ガスが粘膜内で平衡に達するまで少し時間がかかる。しかし、初期における動力的データが足りないため、濃度×時間に依存する形で扱うことが難しい。従って、本毒性モデルでは刺激性影響は瞬時に起こるものとみなしている。

$$X_{FEC} = \sum \frac{[irr.]}{F_{irr.}} \quad \dots \text{式(4)}$$

表 2.2.5 F_{irr} の値

F_{HCl}	1 000 $\mu\text{l}\cdot\text{l}^{-1}$	F_{NO_2}	250 $\mu\text{l}\cdot\text{l}^{-1}$
F_{HBr}	1 000 $\mu\text{l}\cdot\text{l}^{-1}$	$F_{acrolein}$	30 $\mu\text{l}\cdot\text{l}^{-1}$
F_{HF}	500 $\mu\text{l}\cdot\text{l}^{-1}$	$F_{formaldehyde}$	250 $\mu\text{l}\cdot\text{l}^{-1}$
F_{SO_2}	150 $\mu\text{l}\cdot\text{l}^{-1}$		

ISO13344 の評価式が動物実験の致死性の値に基づくのに対して、ISO13571 の評価式は火災生成ガスの人間を無力化する影響のコンセンサス予想値に基づくものである。

2.3 技術の現状と課題

ドイツの DIN では動物試験を用いた燃焼ガス有毒性評価法が定められていたが、EU では適用されなくなった。イギリス海軍の潜水艦使用材料に対して成分ガス分析による評価がある。ニューヨークの規制でマウスを用いた試験により材料の燃焼毒性データの評価。1970年代に日本でマウスを用いた試験による研究が活発化した。アメリカでは1970年代末から1980年代初めに国立標準局を中心として研究が活発化し、実験動物を用いて各種材料の毒性級別、成分ガスをラットに適用した N-Gas モデルの構築、火災危険評価モデルへの適用をいとした輻射加熱による試験法の開発等が実施されたが、1990年代初めには燃焼毒性研究を終了している。ISO ではこれらの研究と並行して、燃焼モデルの統一化、成分ガス、血中有毒成分の分析法、動物試験法の標準化、指針文書の策定、成分ガス分析による毒性評価法等が検討されてきた¹⁴⁾。

日本では木材を中心にガス有害性試験装置を使った成分分析がなされ、動物実験の代替手法のための基礎研究がなされてきたが、実用に至っていない。また、避難安全設計については、煙と有害性ガスの拡散速度を同じとみなし、温度の違いによって生じる二層ゾーンの考え方から、煙降下時間を算出することにより、避難者が安全な場所に到達するのに必要な時間である避難必要時間と火災発生から避難者が行動停止するまでに避難行動が可能な避難許容時間を比較することによって、火災時の煙および有害性ガスが避難者に与える影響を評価している。

2.4 有害性ガスの発生を目的とする試験装置および各国の評価手法¹⁵⁾

各国の評価手法は試験体の加熱方法によって密閉箱型試験(Closed cabinet test)とフロースルー型試験(Flow through test)に大別することができる。両試験種類を比較し、表 2.4.1 に示す。本研究では燃焼条件と燃焼生成物の関係を調べるために、温度や空気量を自由に設定できるフロースルー型試験である ISO チューブ炉および簡略チューブ炉を行った。また、日本の有害性ガス試験は密閉箱型試験である。

表 2.4.1 密閉箱試験とフロースルー型試験の比較

種類	密閉箱型試験 Closed cabinet test	フロースルー型試験 Flow through test
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・ 試験体を熱源で加熱する ・ キャビネットに生成ガスが蓄積される ・ ガスの混合は自然対流 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 流動する空気中で試験体が加熱される
代表例	<ul style="list-style-type: none"> ・ IMO試験 (EU, UK) ・ ASTM E1678 (アメリカ) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ NFX 70-100 (フランス) ・ BS7900 (国際規格)
加熱条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 決められた空気供給量と加熱曲線で加熱を行う 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 温度や空気量を自由に設定できる

密閉箱型試験は固定された熱源で加熱し、加熱によって生成したガスはチャンバーに蓄積される。また、ガスの混合は自然対流によるものである。それに対して、フロースルー型試験は流量がコントロールされた空気中で試験体が加熱される特徴を持つ。

2.4.1 密閉箱型試験

2.4.1.1 IMO 試験

IMO 試験は NBS/NIST のスモークチャンバー試験に基づいており、大型乗客船やビーチクラフトの成分明記のために使用されており、省略された形式が UK で鉄道列車の規格 (BS6852) に使用されている。また、EU でも鉄道列車の規格に使用されている。

IMO 試験は避難者が 30 分間曝露された際を想定して試験を行い、科学的な手法を用いてガス分析を行い、ガス毒性を評価するものである。図 2.3.1 に IMO 試験装置の概略図を示す。

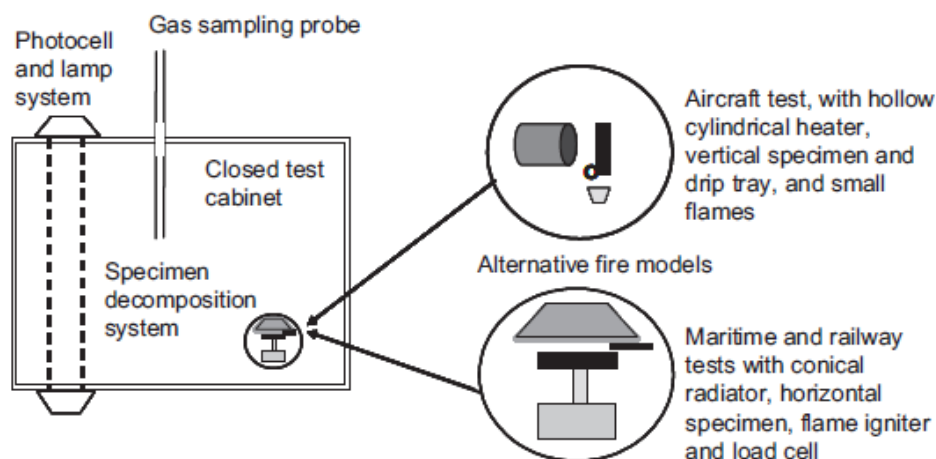


図 2.4.1 IMO 試験の概略図

試験体サイズは $75 \times 75 \text{mm}$ 、厚さ 25mm まで適用される。導点火した後、 50kW/m^2 で加熱し、自燃させて生成したガスをキャビネットの中央よりサンプリングを行う。EU ではガスの成分分析にフーリエ変換赤外分光光度計 (FTIR) が使用される。長所としては幅広い試験体に適用が可能なが、短所として空気の供給量を操作できないことや空気層ができるとサンプリングが正確できず、結果に大きな誤差が生じることが考えられる。

2.4.1.2 NIST 放射炉試験 (ASTM1679)

NIST 放射炉試験は US で建築材料や家具の評価に使用されている。試験装置の概略図を図 2.4.2 に示す。試験体サイズは $76 \times 127 \text{mm}$ 、厚さ 50mm まで適用される。加熱は火花点火器によって着火した後、 50kW/m^2 の輻射熱により 15 分間加熱し、合計 30 分間試験を行う。空気の補充をしながら行うため、完全燃焼である。試験装置のチャンバー部にラットを暴露することで燃焼生成ガスの毒性を評価しているが、評価方法はガス成分分析の結果によって LC_{50} を計算し、 LC_{50} 値によって安全性を判断する。 LC_{50} とは、動物を 30 分間暴露した際に、半分が死亡する場合のガスの濃度である。放射炉試験の長所としては、動物実

験を行うことにより、普通でない試験体の評価も可能になることが挙げられるが、短所は暴露動物のばらつき補正をしていない点である。

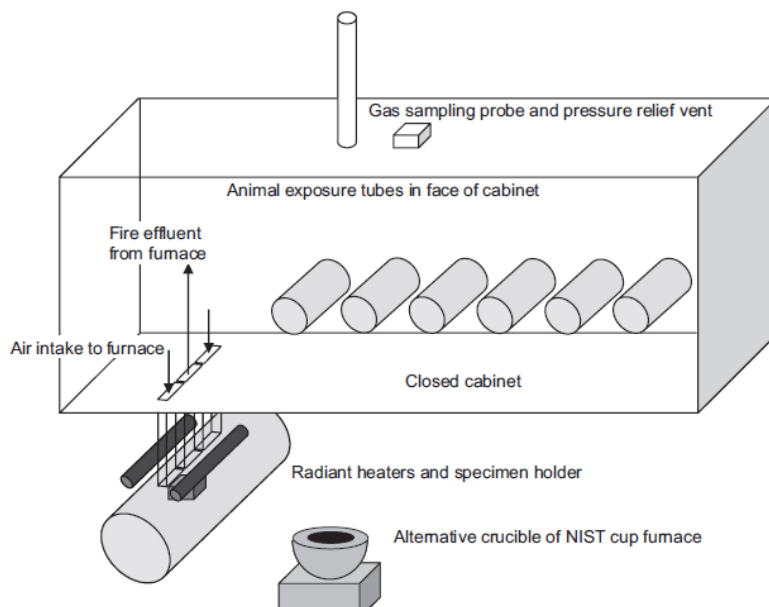


図 2.4.2 放射炉試験の概略図

2.4.2 フロースルー型試験

2.4.2.1 簡略チューブ炉 (NEX70-100)

簡略チューブ炉はフランスの鉄道列車の評価に使用されている。図 2.4.3 に概略図を示す。空気流速 21min^{-1} 下で、試験体を様々な温度環境(400°C 、 600°C 、 800°C)で加熱することが可能である。生成ガスについて、CO および CO_2 は非分散型赤外線分析法 (NDIR) で測定し、HCl や HBr などのガスはサンプリングされ、FTIR やクロマトグラフィー (GC) で分析する。簡略チューブ炉の長所は試験環境が用意であり、簡単に実施することが挙げられるが、短所としては、全種類のガスを分析するために同じ試験を繰り返す必要があることと、それを行うために試験体サンプルが必要なことが考えられる。また、関連する試験として CEI 20-37(イタリア)と AFAP-3(NATO)がある。

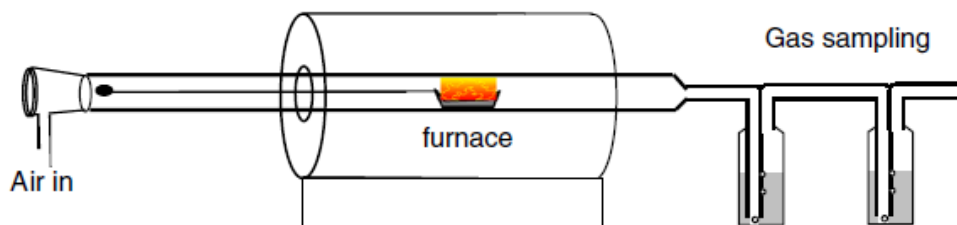


図 2.4.3 簡略チューブ炉の概略図

2.4.2.2 チューブ炉試験

BS7900(イギリス)、ISO13344、ISO13571(国際規格)が同じチューブ炉試験装置を用いて燃焼生成ガスの評価を行う。図 2.4.4 に概略図を示す。試験体の密度が 25mg/mm になるように、長さ 800mm のシリカボードに広げられ、1g/min の割合で空気を流入して試験を行う。攪拌箱内で、空気がさらに加えられ、分析するガス流量が 50l/min になるよう希釈し、ガス成分分析を行う。発生ガスの化学分析は ISO19701, ISO19702(FTIR)に基づいて行う。長所として、成分が未知な物質の毒性も明らかになることと、安定な火炎状態が可能なことが挙げられる。より詳しい条件については本研究の3章で述べる。

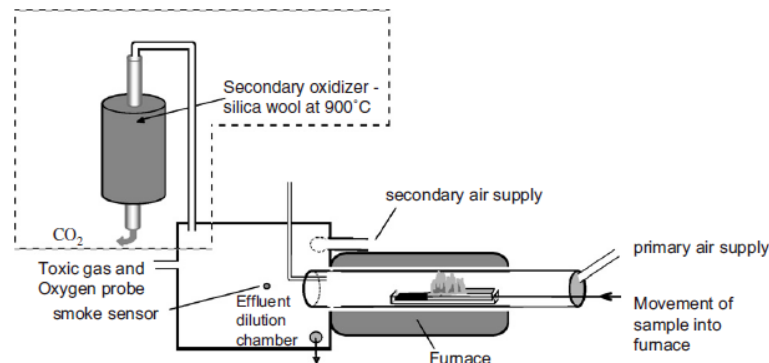


図 2.4.4 チューブ炉試験の概略図

2.4.2.3 PN-88/B-02855 規格¹⁶⁾

オランダの毒性評価規格であり、火災時に生じる毒性ガスを分析し、ドイツ DIN53436 のチューブ炉試験に基づく。サンプル重量は 4g であり、500°C、550°C、750°Cでそれぞれ熱分解を行い、CO、CO₂はガスクロマトグラフィーで分析し、他にはNO₂、HCN、TDI(トルエンジイソシアネート)、HF、HCl、SO₂の分析が行われている。試験はリング炉で加熱された石英チューブ内で行われる。概略図を 2.4.5 に示す。

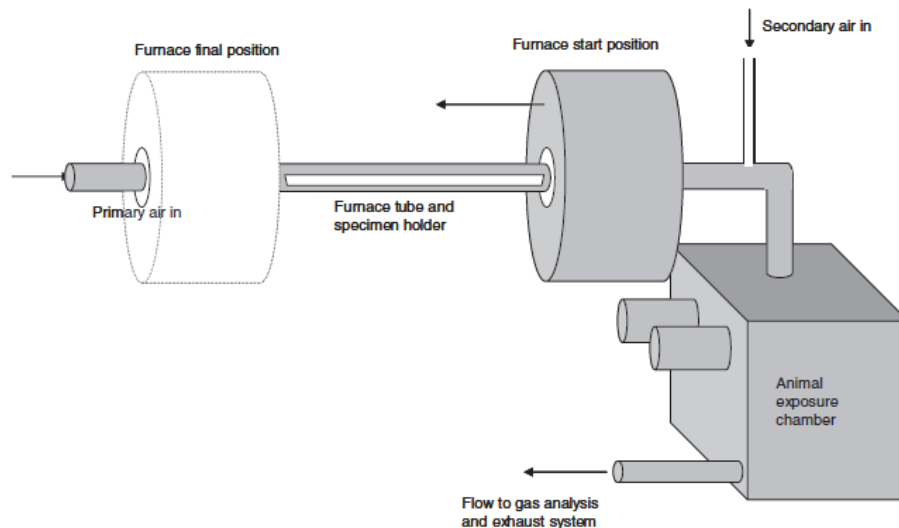


図 2.4.5 PN-88/B-02855 規格装置の概略図

毒性成分はサンプルの燃焼生成物として考えられている。ガスの成分評価は各成分の致死量の濃度に基づき、さまざまな有毒成分の致死濃度(30 分間被曝時)は以下のように考えられている。

CO: 3.75g/m³ NO₂:0.205g/m³ HCl: 1.0g/m³
CO₂:196g/m³ HCN: 0.16g/m³

毒性ハザードの評価は 500℃、550℃、750℃の W_{LC50M} による計算に基づき、W_{LC50M} は各材料を燃焼した時の支配的な成分を決めることができ、毒性生成物によって材料を分類することが可能である。

W_{LC50M} の値に基づく、材料は「毒性がとても強い、毒性が強い、毒性が弱い」の3つのグループに分類でき、表 2.4.1 に示す。

W _{LC50SM} (g/m ³)	Category of toxic hazard in fire	Material
0-15	Very toxic	PVC, rubber, EVA, PA, PAN
15-40	Toxic	Viscose rayon, PU, ABS, wool, PE, PP, fiber board
> 40	Merely toxic	Cotton, hard board, plywood, paper, latex foam, oak, beech wood, pine, silicone rubber, styrofoam, linen, PMMA, PS, poly(ethylene terephthalate)

表 2.4.1 毒性によるグループ分け

2.5 スケールの異なる試験間の比較¹⁷⁾

火災時に生成する有害性ガスについて、生成種類と量は材料の燃焼性や化学組成および火災シナリオの特定条件を含む要因の組み合わせに依存する。従って、実際の火災に影響する条件は複雑であり、ベンチスケールの結果をシミュレーションに適用した場合、結果に大きな誤差が出る。大規模な火災試験結果については、シミュレーションによい結果を出すことができるが、実施が高価であるため、スケールの異なる試験間の結果を比較する必要がある。

2.5.1 ISO9705 のルーム試験と ISO19700 の比較¹⁷⁾

ISO9705 のルーム試験と ISO19700 のチューブ炉試験の試験を行い、CO/CO₂ と当量比、収量を計算した。大規模試験ではばらつきが大きいので、当量比や収量について正確なデータを得ることが難しく、部屋の中の場所によって異なるため、チューブ炉との比較は難しいが、ルーム型試験の状態をよく把握した状況下で、チューブ炉で得られた燃焼物条件と収率はルーム型試験と比較が可能であった。

ISO29903¹⁸⁾ では、異なった火災モデルとスケール間の毒性ガスの比較の手引きが定められている。物理的火災ステージによって予想された火災ステージは ISO19706 に従う必要があり、ISO19706 の火災進展段階条件は図 2.5.1 に示す。

また、スケールの異なる試験を比較するための概略を以下に示し、翻訳の一部を巻末の付録に示す。

Fire Stage	熱 (KW/m2)	最高温度(°C)		酸素(%)		当量比	Vco/Vco2	燃焼効率(%)
		燃料	煙	IN	OUT			
無点火								
1a 自己燃焼型	該当なし	450-800	25-85	20	0-20	-	0.1-1	50-90
1b 酸素熱分解型	-	300-600		20	20	<1		
1c 無酸素外部輻射型	-	100-500		0	0	>>1		
完全燃焼点火								
2 完全燃焼点火型	0-60	350-650	50-500	~20	0-20	<1	<0.05	>95
過剰燃焼点火								
3a 低換気ルーム火災	0-30	300-600	50-500	15-20	5-10	>1	0.2-0.4	70-80
3b フラッシュオーバー	50-150	350-650	>600	<15	<5	>1	0.1-0.4	70-90

図 2.5.1 ISO19706 の火災進展段階の条件

1. 火災時に生成する成分は次の条件によって決まる。

①酸素量 ②雰囲気温度 ③可燃物量

これらの要素は材料の燃焼速度や生成速度によって決まる。

2. 試験体が燃焼中に受ける熱環境は

①ガス温度 ②試験体の材料の温度 の二つを含む。

3. 比較する物理火災モデルの換気状態が燃焼状態を決定する。

従って、異なるモデルを比較するには換気状態の特徴を知ることが必要。

4. 毒性ガスは似た燃焼状態で比較されなければならない。

(火災ステージ、CO/CO₂比率、当量比)

毒性ガスの産量は似た火災ステージや同じ火災ステージの連続で比較すべきである。

CO/CO₂比率は燃焼に対する酸素の能力を示し、色んな燃焼状況を示す。計測した CO/CO₂比率は色んな状況において比較の基本として使える。しかし、この法則はハロゲン族を含む材料には使えない。

実規模大スケール試験では燃焼温度および下層温度が毒性ガスの生成を影響するため、考慮する必要がある。

5. 毒性ガス関連の直接比較に適したデータに対し、異なったスケールの2つの試験を直接比較できる。ex)産量 (yield), 生成率 (production rates)。直接比較に適していないデータは、間接比較を可能にするモデルが必要である。

以上のことから、本研究では火災時避難者に与える有害性ガスの濃度および種類を評価するために、火災ステージそれぞれに対してチューブ炉試験を行った。その結果および詳細を3章5章に示す。

参考文献

- 1) 第一章災害の現状と課題, 第一節火災予防, 2. 火災による死者情況, 平成29年版 消防白書
- 2) 第一章災害の現状と課題, 第一節火災予防, 4. 出火原因, 平成29年版 消防白書
- 3) 高橋太, 佐田立朗, 関谷文男: 火災による死因の生理学的検討結果報告, 火災 日本火災学会誌 Vol.42 No. 3(199)
- 4) 火災の原因調査結果(広島県福山市ホテル火災)の公表, 平成25年5月28日, 消防庁
- 5) William L. Grosshandler, Nelson P. Bryner, Daniel M. Madrzykowski, K Kuntz: Report of the Technical Investigation of The Station Nightclub Fire (NIST NCSTAR 2), Volume 1, June 30, 2005
- 6) 上村雄二、塩谷俊行、谷池史章, 火元から離れた場所で死者が発生した火災の調査報告, 火災, 348 Vol.67 No.3, 2017年6月
- 7) ISO 13344-2004 Estimation of the lethal toxic potency of fire effluents
- 8) ISO 13571-2012 Life-threatening components of fire —Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires
- 9) 鈴木 忠, 石川 雅健, 小濱 啓次, 杉山 貢, 野口 宏: 火災時の有毒ガスによる人体への影響その2 一酸化炭素ガスへの対応, 火災 Vol.52 No.1, 2002.2
- 10) 仲谷 一郎: 建築火災における毒性ガスの発生メカニズム, 火災 Vol.52 No.3, 2002.6
- 11) 高橋 太: 火災ガスの毒性について, 自主防災 No.236, 2013.11
- 12) 北村 芳嗣, 高橋 太: 火災時の有毒ガスによる人体への影響その1 火災時の有毒ガスの人体への影響に関する調査専門委員会について, 火災 Vol.51 No.5, 2001.10
- 13) 東京消防庁: 火災による死因の生理学的検討結果報告書, 1992.4.3
- 14) 福田泰孝, 遊佐秀逸: 建築材料の燃焼時におけるガス有害性に関する一考察 —ガス有害性試験における木質系材料の性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2006.9
- 15) T.Richard Hull, Keith T.Paul: Bench-scale assessment of combustion toxicity -A critical analysis of current protocols
- 16) J.Fangrat: Evaluation of Toxicity to PN-88/B-02855, Plastics Flammability Handbook, pp.366
- 17) A.A.Stec, T.R.Hull, J.A.Purser, D.A.Purser: Comparison of toxic product yields from bench-scale to ISO room, Fire safety journal, 44(2009)62-70, 2008
- 18) ISO 29903:2012 Guidance for comparison of toxic gas data between different physical fire models and scales

第3章 ガス有害性試験の代替手法

現行のガス有害性試験は動物試験であり、動物実験であるため、建築材料固有の分解・燃焼生成ガスの定量分析が出来ず、生成ガスの有害・有毒性の個別評価が難しいことから、避難安全設計を行う際に評価する有害性ガスの影響を測ることができない。建築材料の火災時の有害・有毒性を評価するためには、試験結果を数値化し、その妥当性を確かめる必要がある。また、動物愛護の観点からも、有害性ガスを正確に評価するためにも、ガス成分分析を使った代替手法の提案が必要である。

本章では、ガス成分分析を使ったガス有害性試験の代替手法を提案するために、ガス有害性試験装置を用いて建築材料を燃焼させ、FTIR でガス成分分析を行った。その結果に基づいて試験体の有毒・有害性を求め、現行のガス有害性試験結果と比較を行い、マウスの平均行動停止時間とガス成分分析の関係性を明らかにすることにより、ガス成分分析に基づく有害性試験の代替手法を提案した。

さらに、火災避難時に煙や有害性ガスが避難者の歩行速度を遅らせることが知られているが、有害性ガスが歩行速度に与える影響を調べるために、ガス有害性試験中のマウスの回転速度を測定し、歩行速度に影響を与えるガスと比較を行った。

3.1 ガス有害性試験について

ガス有害性試験は、建築基準法、法第2条第九号(不燃材料)の規定に基づく認定に係わる性能評価に対し、4.9.3 に規定するガス有害性試験・評価方法によって行うものである¹⁾。

試験体の形状および寸法は1辺の大きさが 220 mm±10 mmの正方形で、厚さは 15 mm以下である。試験体装置は加熱炉、攪拌箱、被検箱、回転かご、マウス行動記録装置等で構成され、概略図を図 3.1 に示す。攪拌箱と被検箱のサイズは 50×50×50cm である。

試験は、1次空気供給装置から 3L/分、2次空気供給装置から 25L/分の空気を供給しながら、副熱電源(プロパンガス)で3分間加熱後、主電源(1.5kW)を加えて3分間加熱する。被検箱内の温度を 30℃以下とし、マウスを一匹ずつ入れた回転かごを8個被検箱内に設置する。被検箱からの排気量は 10L/分とし、加熱終了するとともに空気供給と排気を停止する。加熱を始めてからマウスが行動を停止するまでの時間を加熱開始から 15分経過するまで記録し、次の式で求めたマウスの平均行動停止時間(X_s)の値が 6.8分以上の基準を満足する場合に合格となる。6.8分は基準材である赤ラワンを燃焼した際のマウスの平均行動時間である。

$$X_s = X - \sigma$$

X : 8匹のマウスの行動停止までの時間 (マウスが行動を停止するに至らなかった場合は、15分とする) の平均値 (分)

σ : 8匹のマウスの行動停止までの時間 (マウスが行動を停止するに至らなかった場合は、15分とする) の標準偏差 (分)

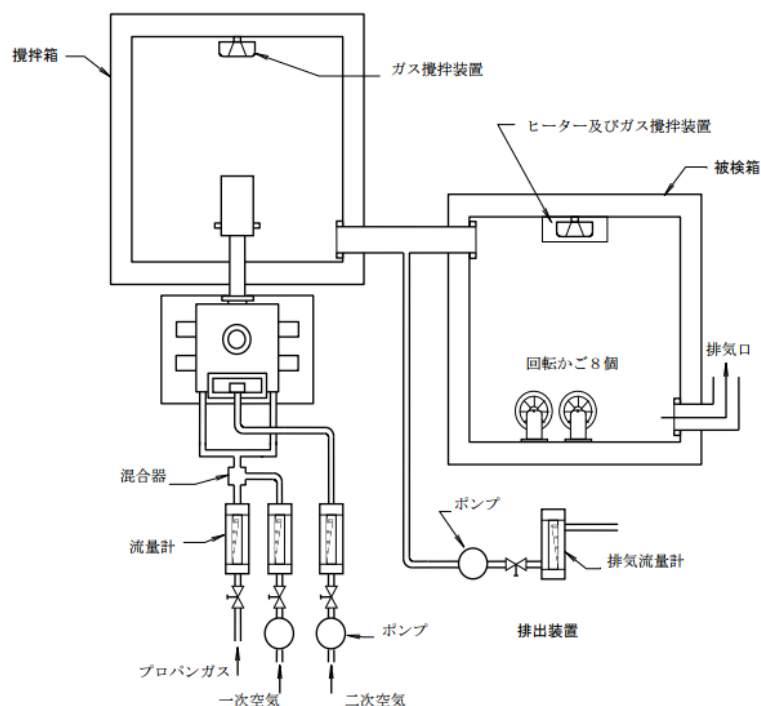


図 3.1.1 ガス有害性試験装置 概略図

3.1.1 ガス有害性試験の適用関係

不燃材料の試験・評価方法の適用関係について図 3.2 に示す。

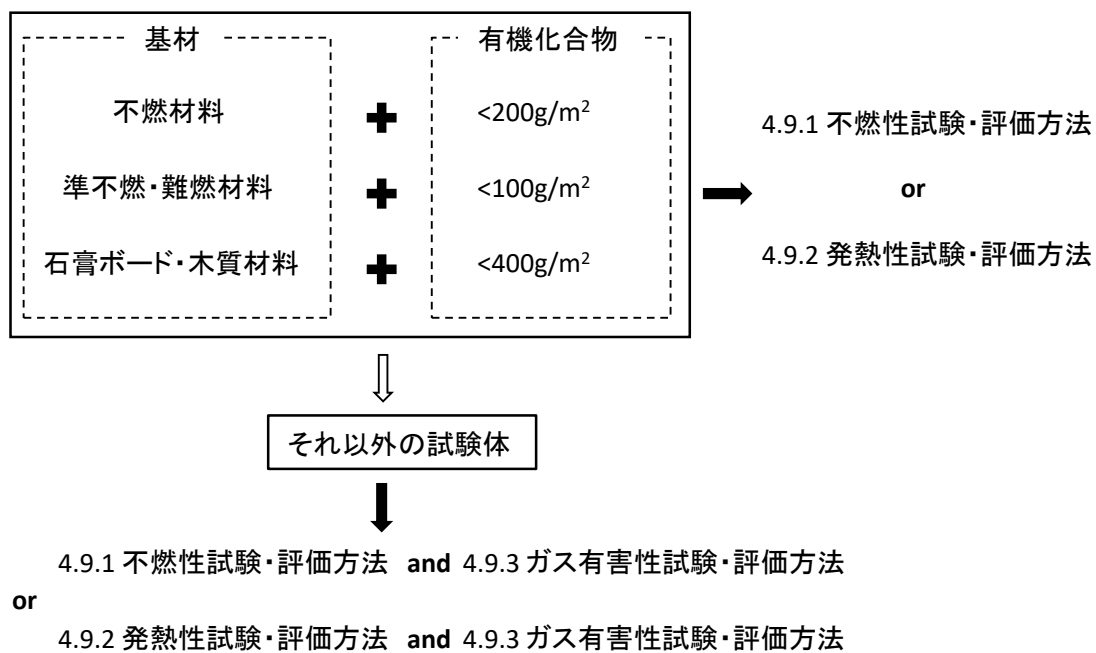


図 3.1.2 不燃材料の試験・評価方法の適用関係

3.2 実験概要

本研究では、現行のガス有害性試験の基準値をガス成分分析の結果を使って評価し、代替手法を提案するために、ガス有害性試験の試験手順に準じて実験を行った。図 3.2.1~3 に示す試験装置を用いて、加熱試験を行った。実験条件を表 3.2.1 に示す。排気口 a から 3L/分（中間排気量を 10L/分としている）で燃焼生成ガスをサンプリングし、フーリエ変換赤外分光連続ガス分析装置（FTTOEM 製 CCGMS；以下 FTIR）でガス濃度の測定を行った。FTIR の写真を写真 3.2.1 から写真 3.2.3 に示す。また、b の位置で排気(煙)温度、c で被検箱内温度の測定を行った。被検箱 c 内にはマウスを一匹ずつ入れた回転かごを 8 個設置した。

	加熱方法	空気供給量	排気量
0～3分	プロパンガスバーナー	1次空気 3L/分	10L/min
3～6分	1.5kWの電気ヒーター	2次空気 25L/分	
6分～15分	停止		

表 3.2.1 ガス有害性試験の実験条件

さらに、マウスの回転速度を測定するために、2つの回転かごにロータリーエンコーダーを取り付けた。加熱は、始めにガスバーナーで3分間加熱した後、さらに 1.5kW の電気ヒーターで3分間加熱を加え、合計6分間加熱した。各測定は、試験加熱開始後から30分間行った。

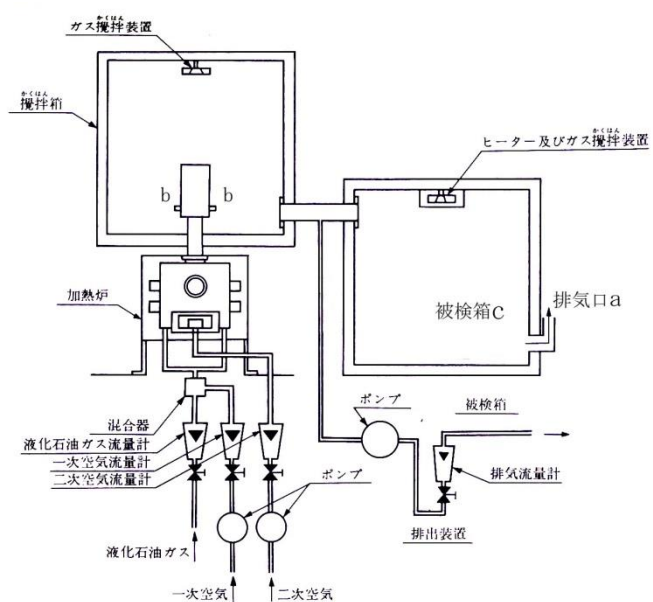


図 3.2.1 ガス有害性試験装置



写真 3.2.1 ガス有害試験装置



写真 3.2.3 フーリエ変換赤外分光連続ガス分析装置(FTIR)



写真 3.2.2 FTIR 制御部



写真 3.2.4 FTIR ガス分析測定部

3.2.1 回転速度の測定

回転数測定装置としてロータリーエンコーダーを被検箱 c の中で回転かご 2 番と 5 番に取り付けて設置(図 3.2.5)し、回転角度の測定を行った。測定は Arduino を使って記録し、Arduino とエンコーダーの配線は図 3.2.7 のようにした。また、2つのエンコーダーを動かすために Arduino の内蔵電流だけだと不足していたため、9V の外部電源に繋いで測定を行った。ロータリーエンコーダーのデータを取り込む時のプログラムコードを巻末の付録 2 に示す。回転かごの半径を 5cm とし、エンコーダーより得られた角速度から回転速度を計算した。

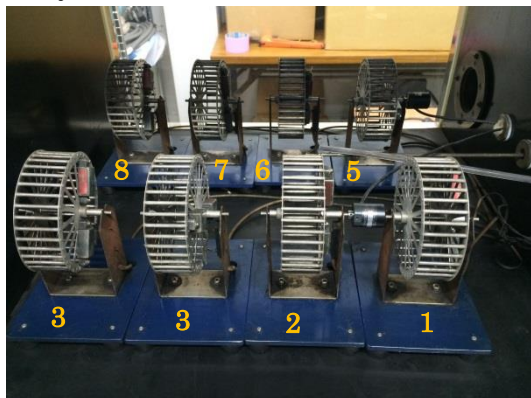


写真 3.2.5 回転かご

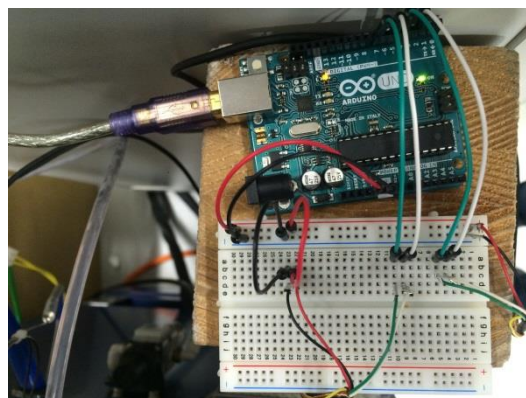


写真 3.2.6 Arduino 配線

3.3 試験体

試験体は壁紙(ポリエステル、塩化ビニル、絹、レーヨン)、PET200mm、ナイロン 6(300mm)、ナイロン 6,6(200, 300mm)、スギ(不燃、準不燃、無垢)、ラワン、フォーム(ヌレート、ウレタン)、アクリル(200mm)、ウレタン(200mm)の 15 種類とした。試験体の詳細を表に示す。

表 3.3.1 試験体について

試験体		サイズmm	厚さmm	重さg
フォーム	ウレタンフォーム	219×220	2.53	19.45
	ヌレートフォーム	221×226	2.54	56.29
壁紙	ポリエステル	220×220	10.04	343.12
	塩化ビニル	221×220	9.50	329.61
	絹	220×220	10.01	335.19
	レーヨン	220×220	10.18	344.21
樹脂	ウレタン200mm	220×234	0.64	75.75
	アクリル200mm	221×230	0.73	78.62
	ナイロン200mm	233×222	0.68	80.17
	ナイロン400mm	235×220	0.96	93.81
	ポリエチレンテレフタレート200mm	221×231	0.67	80.91
木材	スギ無垢	219×221	15.10	303.91
	スギ準不燃	220×222	12.42	298.08
	スギ不燃	220×221	17.54	466.96
	ラワン無垢	220×218	9.93	204.60

壁紙は加熱部に設置できるよう、準不燃石膏ボード標準版に貼りつけた。石膏ボードにはシーラーを塗布した後、接着剤を使用して貼り付けを行った。シーラは 22cm 角 1 枚あたり(シーラー:水=1:2)に希釈されたものを 3.63g 塗布し、接着剤は、シルクは 22cm 角 1 枚あたり原液 7.8g を使用し、その他は原液 8.2g を使用した。使用した接着材およびシーラーの仕様詳細については資料 1 に示す。

フォーム材は熱で融解し、流れ落ちる恐れがあるため、裏面をアルミホイルで覆い、加熱を行った。

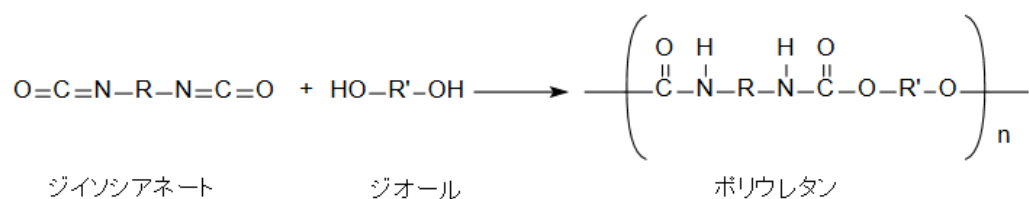
3.4 実験結果

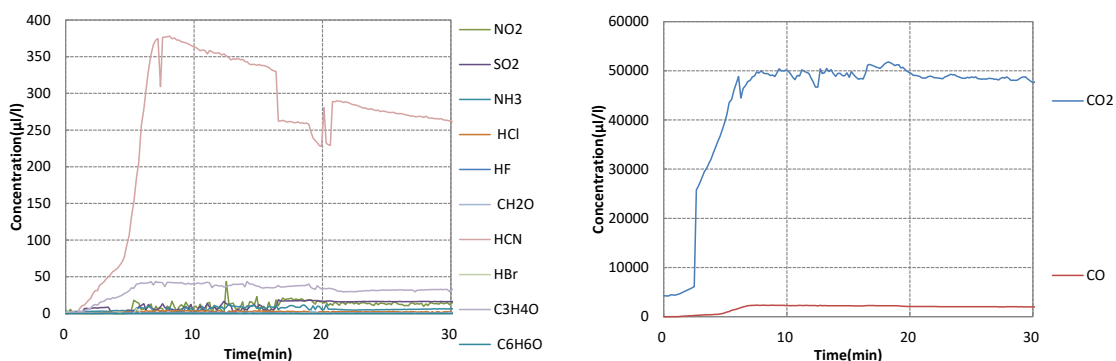
3.4.1 ガス成分分析結果

燃焼実験により生成した有害性ガスを FTIR によってガス成分分析を行い、その結果を図 3.4.1(a)~(k)に示す。

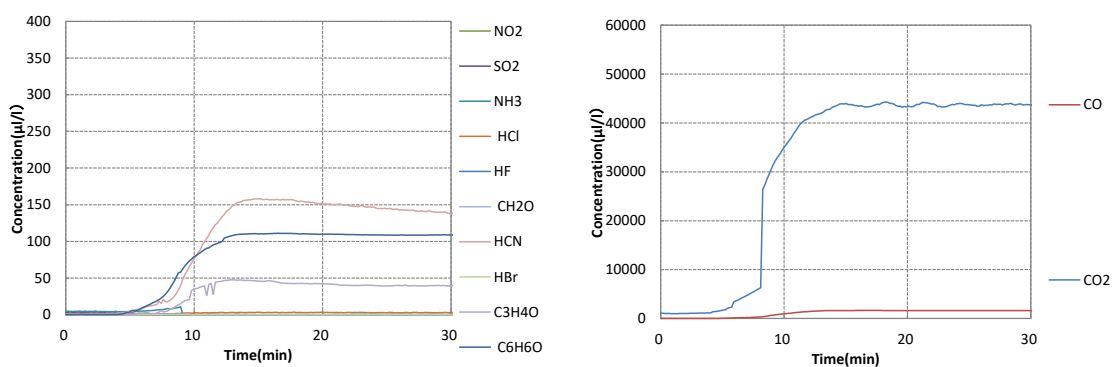
3.4.1.1 フォーム

図 3.4.1(a)(b)にウレタンフォームとヌレートフォームの結果を示す。ポリウレタンフォームとは、ポリウレタンを骨格とする発泡体であり、ポリウレタンを合成する際、下図のようにグリコール成分（ジオール）とジイソシアネート成分が水により反応し、橋架け結合によって網状化する際に発生するガス（CO₂）を利用して、発泡体を作る。





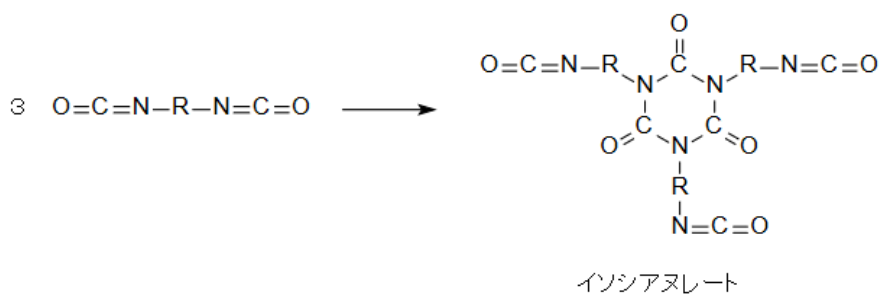
(a) ウレタンフォーム



(b)ヌレートフォーム

図 3.4.1 ガス成分分析結果 その1

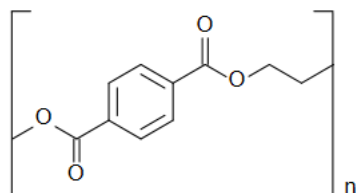
ヌレートフォームは、イソシアヌレートフォームであり、過剰量のイソシアネートと特殊触媒を用いて一部下図のようにイソシアヌレート環状構造にし、耐炎性や耐熱性を高めたものである。



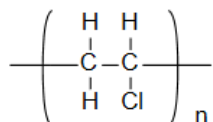
ウレタン、ヌレートの生成ガスについて比較すると、種類はともに窒息性ガスとして HCN や CO、刺激性ガスとして C₃H₃O が多く生成した。燃焼損失量はウレタンの方が高く、生成ガスの濃度が高い結果となった。ヌレートではフェノールが多く発生し、これは含まれる芳香族の濃度が高いことが理由として考えられる。

3.4.1.2 壁紙

図 3.4.1(c)–(f)に壁紙ポリエステル、塩化ビニル、シルク、レーヨンの結果を示す。ポリエステルはジカルボン酸とジオールの重縮合体。壁紙ポリエステルにはポリエチレンテレフタレート(PET)が使われている。化学構造は下図となる。

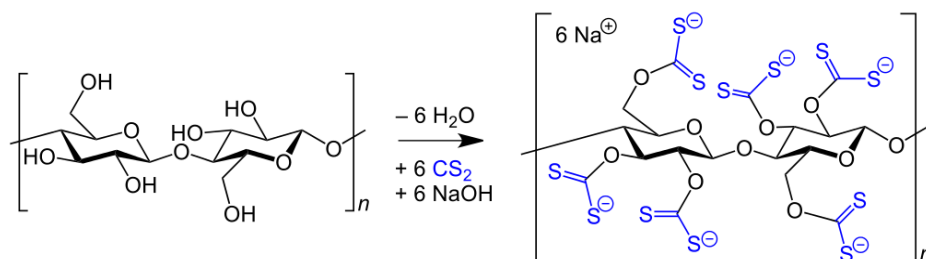


壁紙塩化ビニルはポリ塩化ビニルが主な成分はクロロエチレンを重合したポリ塩化ビニルであり、合成樹脂の一つである。化学構造は下図となる。

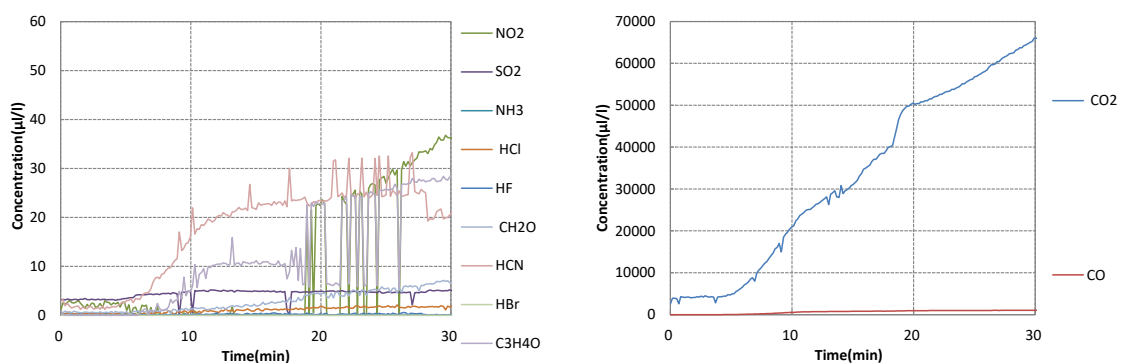


壁紙シルクは動物繊維が使われ、主要成分はフィブロインとなる。フィブロインは分子量約 37 万である繊維状たんぱく質である。

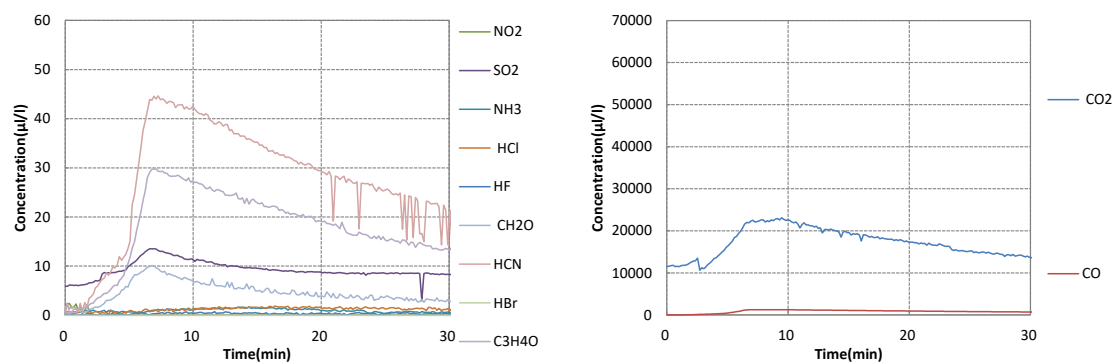
壁紙レーヨンには植物繊維であるレーヨンが使われ、レーヨンは天然のセルロース繊維をコロイド溶液にし、それを再度セルロース分子に戻すことで高分子を再集合させ、自在の長さ、形状のセルロース繊維としたものである。化学構造は下図となる。



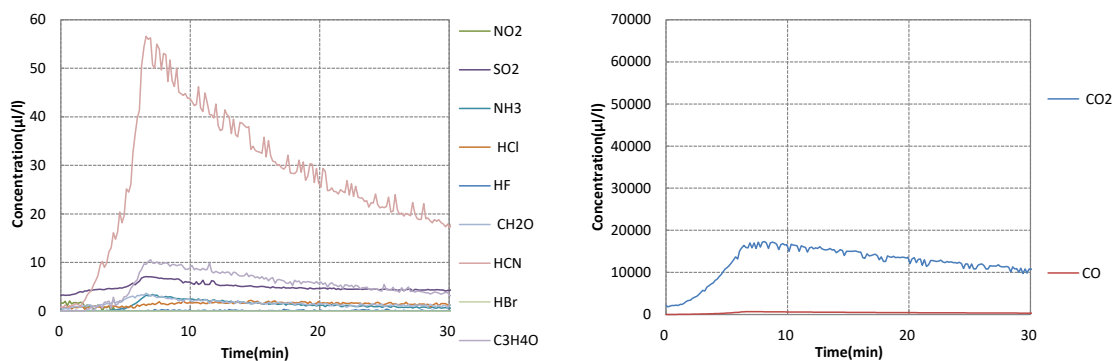
壁紙の生成ガスについて比較すると、種類はともに窒息性ガスとして HCN や CO、刺激性ガスとして C₃H₃O と SO₂ が多く生成した。また、塩化ビニルではほかと比べて CH₂O が生成したが、HCl の生成は見られなかった。壁紙から発生するガスはせっこうボードとの接着のために使う接着剤とやシーラの影響が強いと考えられる。



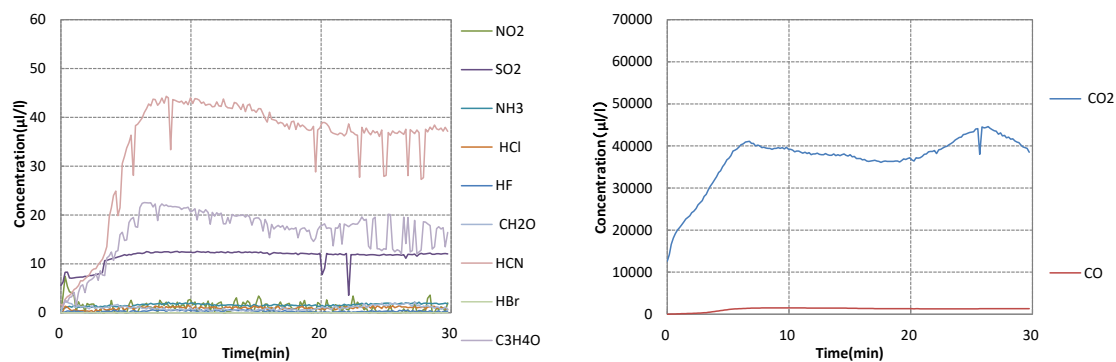
(c)壁紙ポリエステル



(d)壁紙塩化ビニル



(e)壁紙シルク



(f)壁紙レーヨン

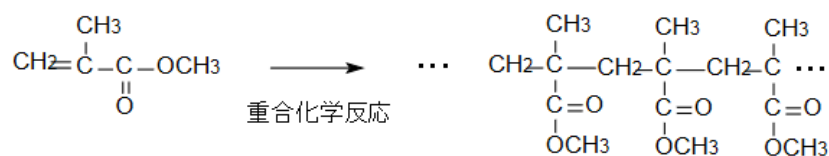
図 3.4.1 ガス成分分析結果 その2

3.4.1.3 樹脂

図 3.4.1(g)–(k)に樹脂のウレタン(200mm)、アクリル(200mm)、ナイロン(200・300mm)、PET(200mm)の結果を示す。

ウレタンは(a)とは異なる会社から試験体提供されたものである。

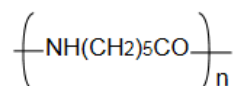
アクリル樹脂は下図のように MMA モノマーに重合開始材や熱を加え、化学反応によって作られた樹脂である。



MMAモノマー

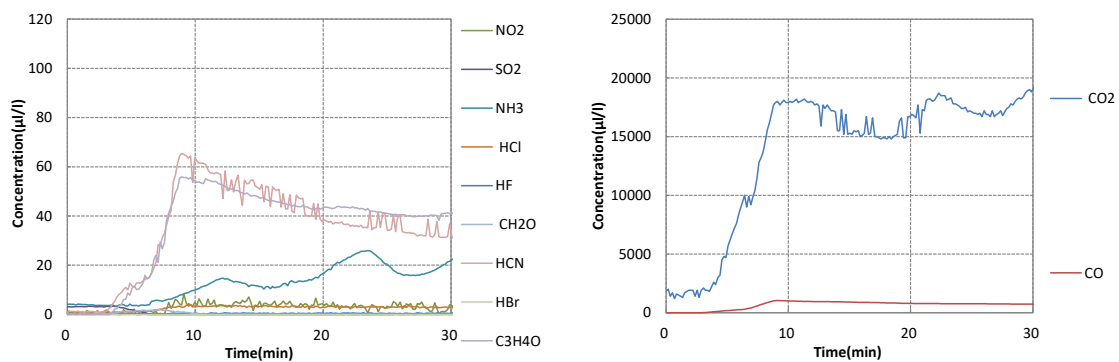
アクリル樹脂

ナイロンはナイロン6であり、アミド結合によって多数のモノマーが結合してできたポリマーである。化学構造は下図となる。

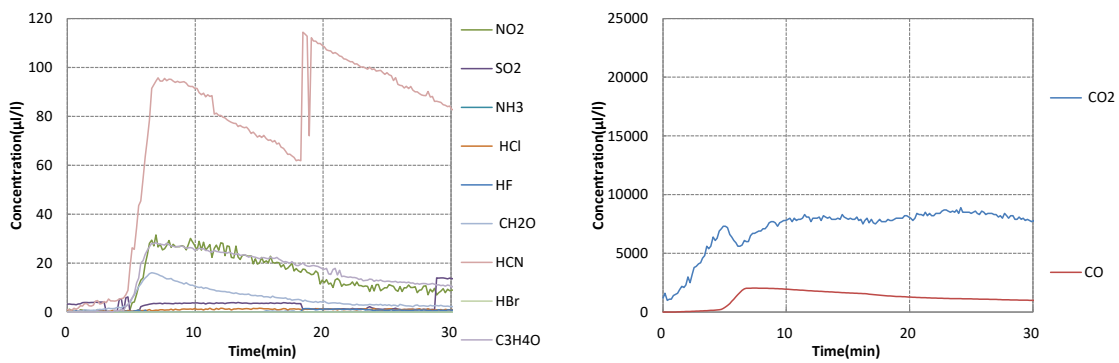


PET は(c)とは異なる会社より試験体提供されたものである。

樹脂の生成ガスについて比較すると、PET が濃度低かったのに対し、アクリルが一番濃度高いガスを生成した。種類については、ウレタンとナイロン 200mm が刺激性ガスの NH_3 を多く生成し、アクリル、ナイロン 300mm、ウレタンは窒息性ガスの HCN を多く生成した。そのほか、ウレタンとアクリルは $\text{C}_3\text{H}_3\text{O}$ を生成した。また、ナイロンの 200 と 300mm はそれぞれ異なる種類のガスが生成したことから、樹脂の燃焼は膜の厚さに比例しないことが確かめられた。

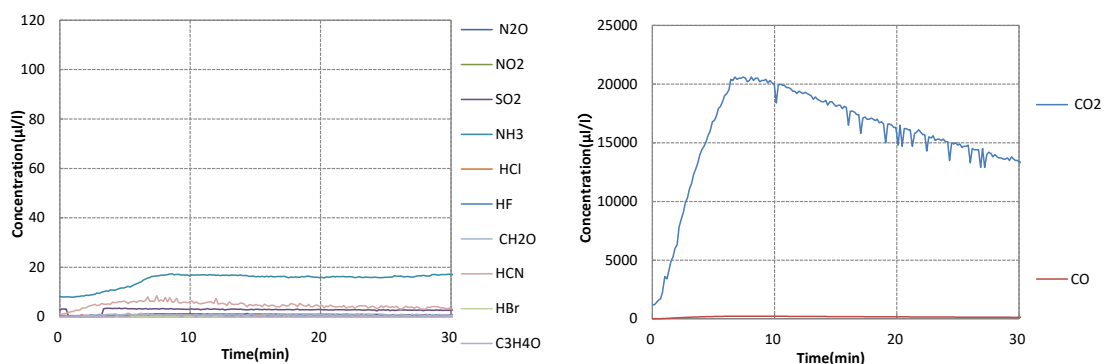


(g)ウレタン 200mm

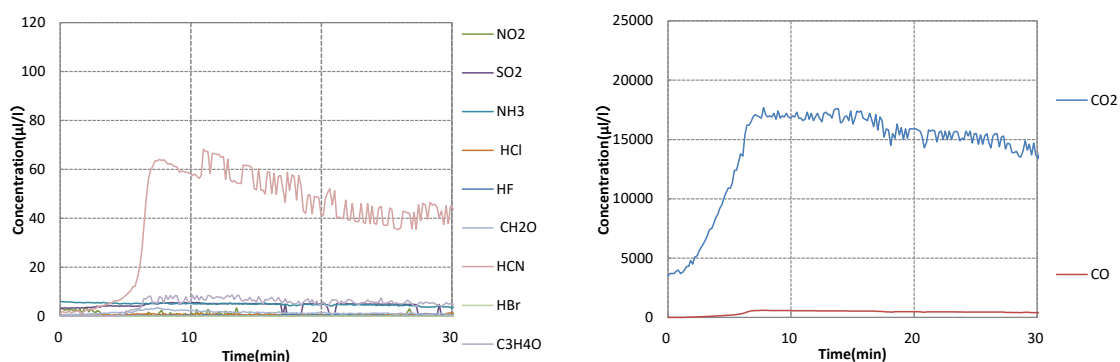


(h)アクリル 200mm

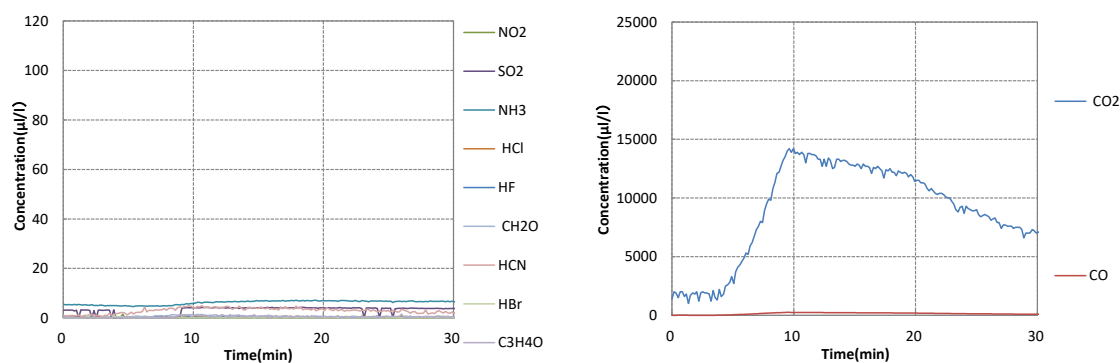
図 3.4.1 ガス成分分析結果 その3



(i) ナイロン 200mm



(j) ナイロン 300mm

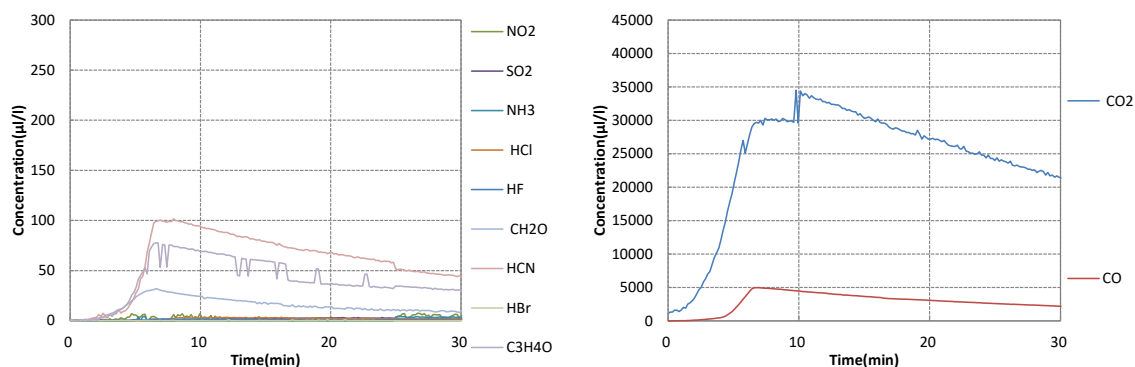


(k) ポリエチレンテレフタレート 200mm

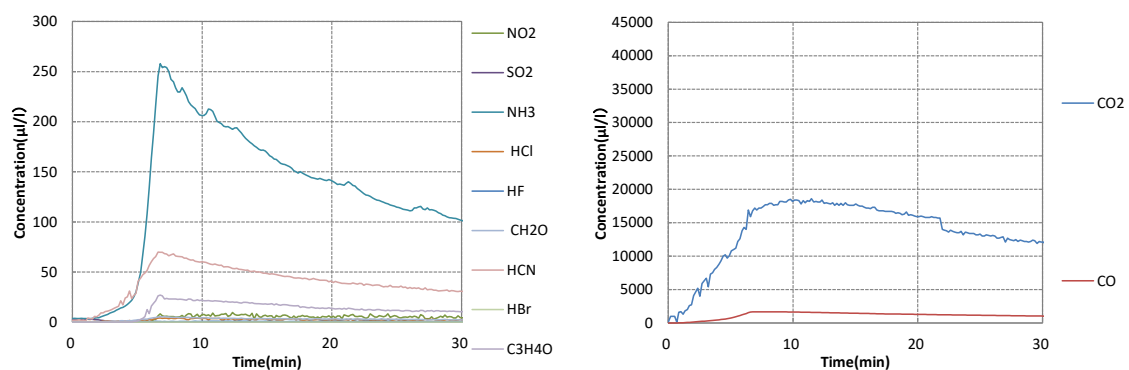
図 3.4.1 ガス成分分析結果 その4

3.4.1.3 木材

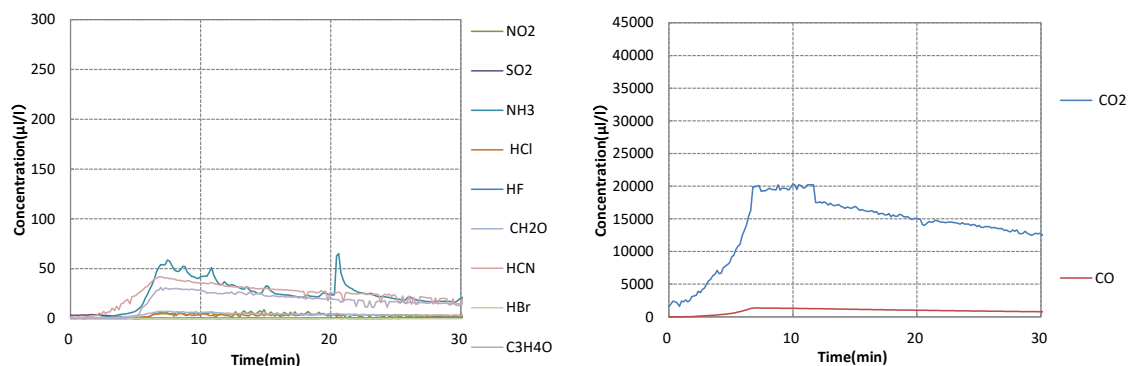
図 3.4.1(l)–(o)にスギ無垢、準不燃、不燃、ラワン無垢（基準材）の結果を示す。木材の生成ガスについて比較すると、スギとラワン無垢ともに HCN、 C_3H_3O 、CO が多く生成し、スギ無垢は CH_2O も生成した。スギ不燃と準不燃については、HCN、 C_3H_3O 、CO のほか、 NH_3 が生成した。これは不燃処理に使われた薬剤(リン酸塩化合物、ホウ素化合物)が影響していると考えられる。



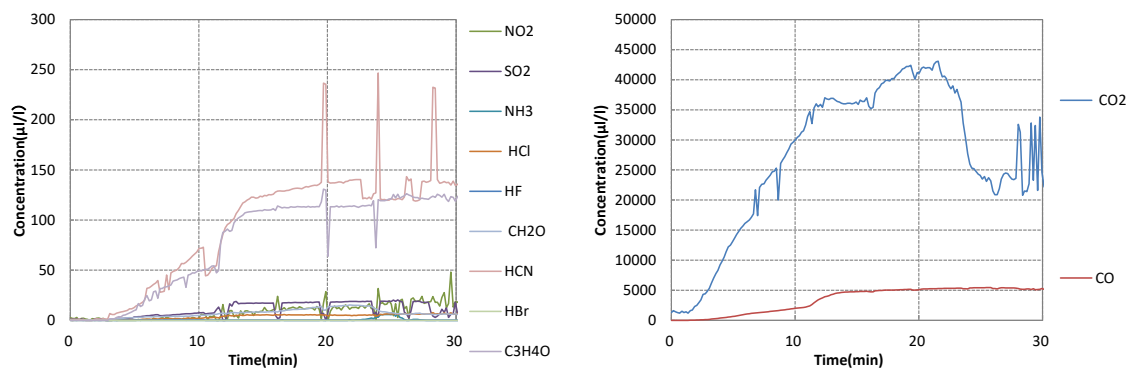
(l)スギ無垢



(m)スギ準不燃



(n)スギ不燃



(o)ラワン

図 3.4.1 ガス成分分析結果 その5

3.4.2 有害性ガス生成量と行動停止時間

試験体ごとに一酸化炭素以外の各種有害性ガスの生成量を図 3.4.2 に示す。ガスの種類については人体に有害とされる 10 種類²⁾とした。生成量については、20 秒ごとにガス成分分析測定結果に対して 30 分間の積分値を求めた。図 3.4.2(a)~(b)に示されるフォーム材については、ウレタンフォームから多くの HCN が生成し、ヌレートフォームから C₆H₆O（フェノール）が生成した。これは含まれる芳香族の濃度が高いことが理由として考えられる。図 3.4.2(c)~(f)に示される壁紙については、どの試験体からも HCN が生成した。壁紙シルクから比較的多くの NO が生成した。図 3.4.2(g)~(k)に示される樹脂については、ウレタン樹脂はフォームと同じ種類の有害性ガスが生成した。アクリルやナイロンからは HCN が多く生成した。

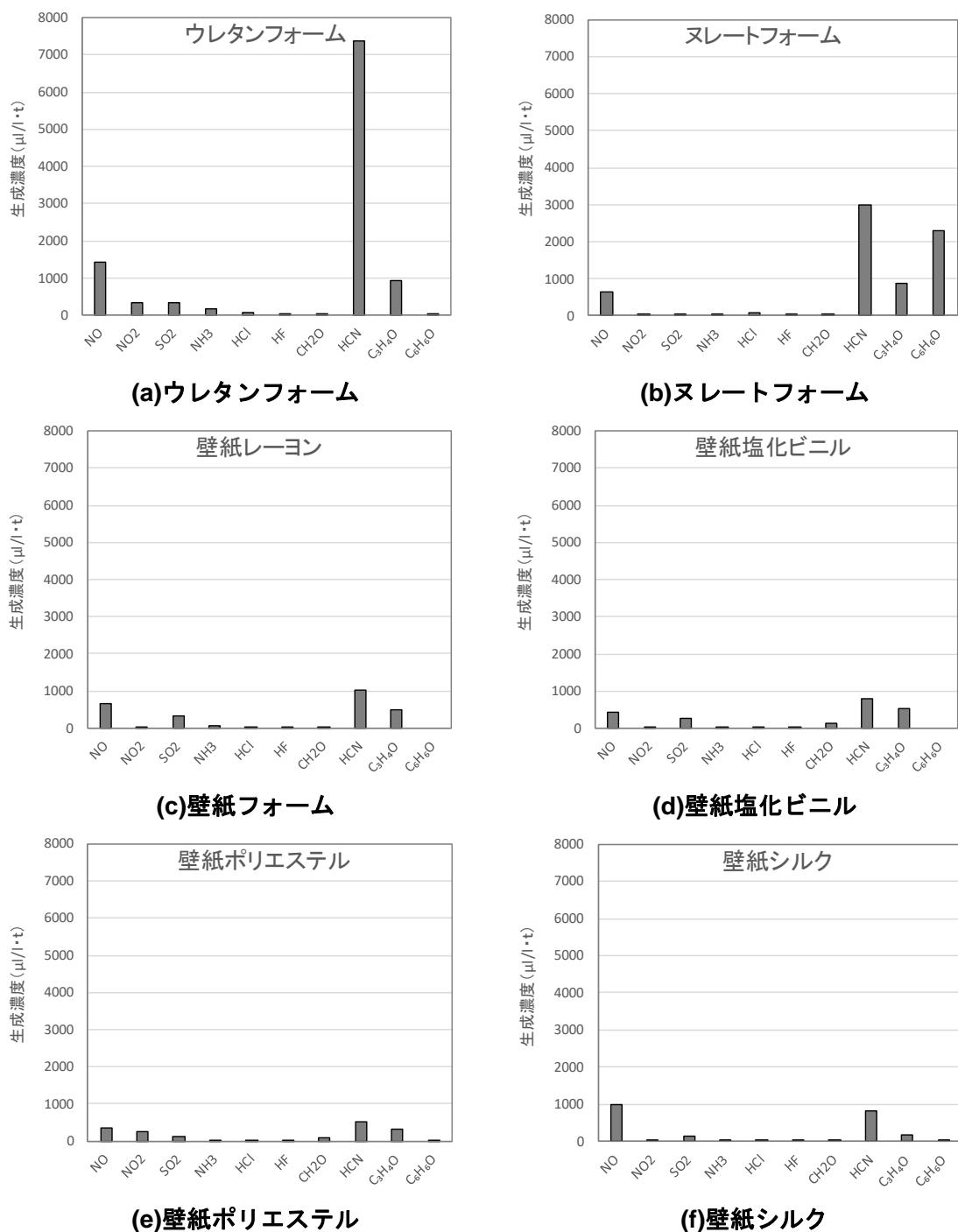


図 3.4.2 各種有害性ガスの生成量 その1

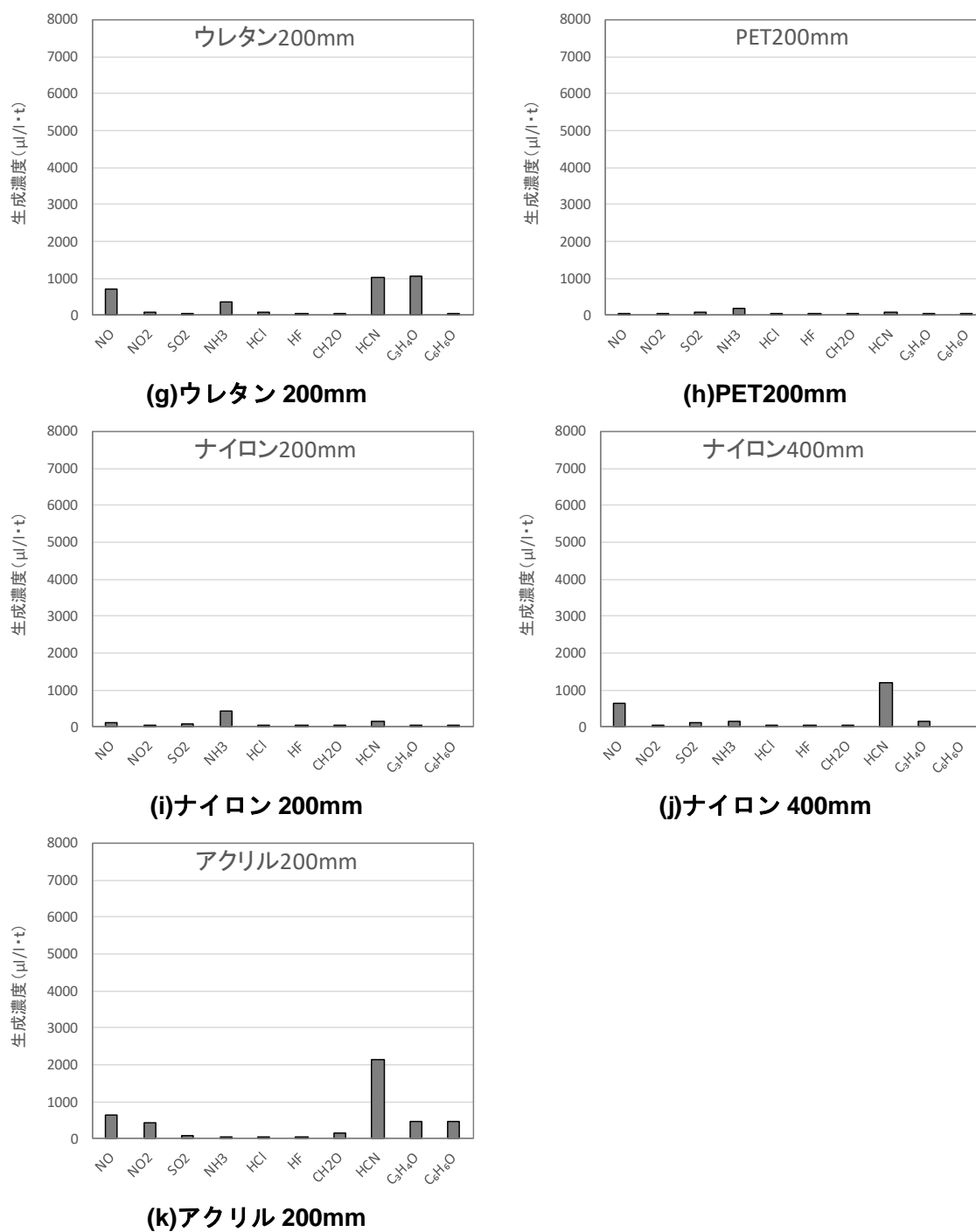


図 3.4.2 各種有害性ガスの生成量 その2

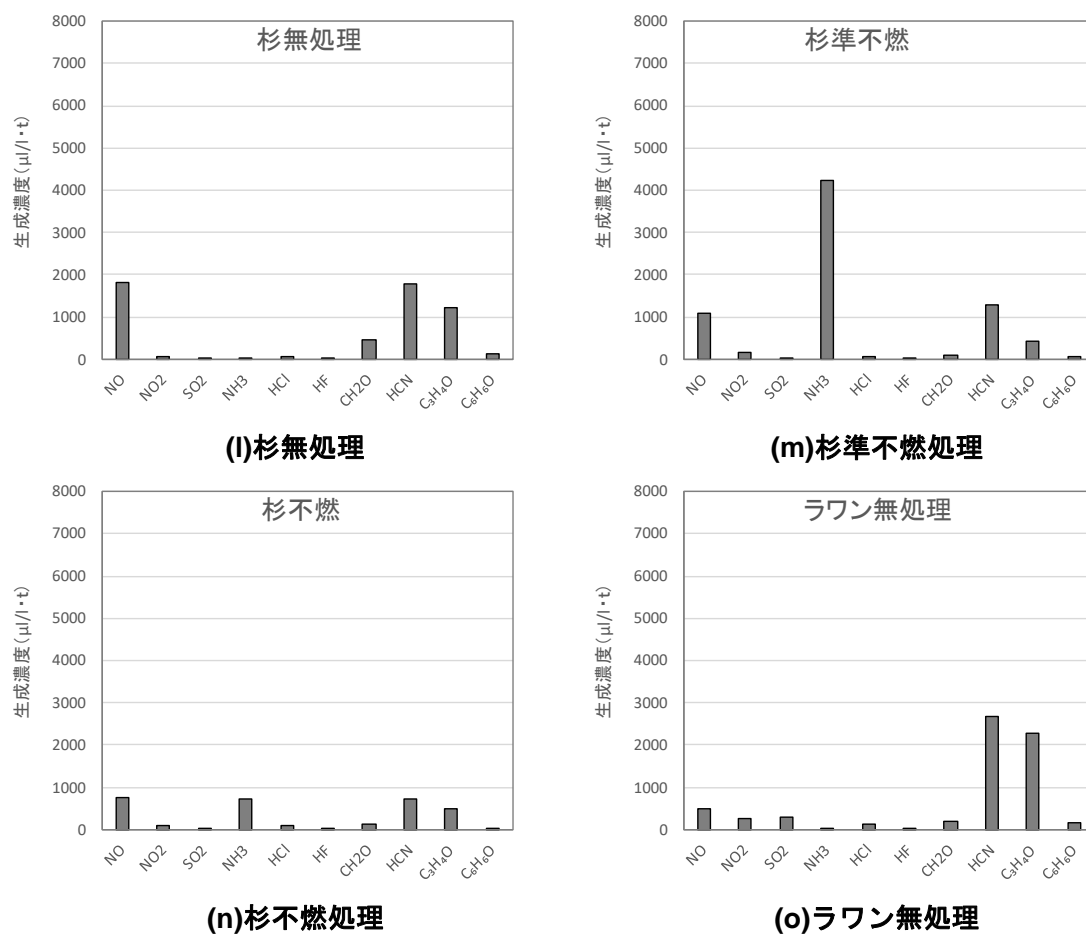


図 3.4.2 各種有害性ガスの生成量 その3

生成量のうち、マウスの行動停止に影響を及ぼすとされている一酸化炭素およびシアン化水素の生成量を示し、マウスの行動停止時間と比較し、図 3.4.3 に示す。一酸化炭素は血液中のヘモグロビン（Hb）と結びついて細胞への酸素補給を障害し、組織、臓器不全を来たすものであり、シアン化水素は血液中で酸化酵素の鉄分子と結合して酸素の活性作用を阻害する。いずれのガスも窒息性影響をもたらすガス種であるとされている³⁾⁴⁾。

一酸化炭素とシアン化水素の生成量の合計を多い順に左から図 3.4.3 に示し、マウスの行動停止時間の結果と比較すると、おおむね生成量が増加すると行動停止時間が短くなる関係となっている。しかし、ウレタン樹脂およびウレタンフォームについては、生成量に対し、他の試験体と比べ、より行動停止時間が短い結果となった。これは、図 3.4.1 より、ウレタン系試験体は実験開始から 5 分前後でシアン化水素が急激に増加したのに比較し、木材系試験体は増加が緩やかであり、難燃剤を含むスレートフォームは増加開始時間が遅かったためであると考えられる。また、壁紙系やウレタン以外の樹脂系試験体については、有害性ガスの生成量が少なかったため、行動停止時間が長く、もしくは行動停止に至らなかった。

以上のことから、マウスの行動停止時間と窒息性ガスに密接な関係性があり、ガス成分分析結果から行動停止時間を予測するために、シアン化水素および一酸化水素の影響を評価した ISO13571 の窒息性ガス毒性モデルを用いて毒性値の計算を行う。ISO133571 の窒息性ガスモデルは、暴露量を蓄積するものとして積算し、1.0 を超えた時間を避難するに危険な時間としている。さらに、30 分間暴露された齧歯類と関連付けられた火災による致死毒性を評価し、有害性ガスが行動停止に与える複合的影響を評価した ISO13344 の毒性モデルを用いても計算を行った。毒性モデルの適切性は実験結果と比較を行い、ガス有害性試験におけるマウスの行動停止時間を評価するのにより適切な毒性モデルを選択し、ガス成分分析による基準値の評価に用いる。

回転速度を評価するために、有害性ガスの刺激性影響については同じ ISO13571 の刺激性ガスモデルを用いて計算する。

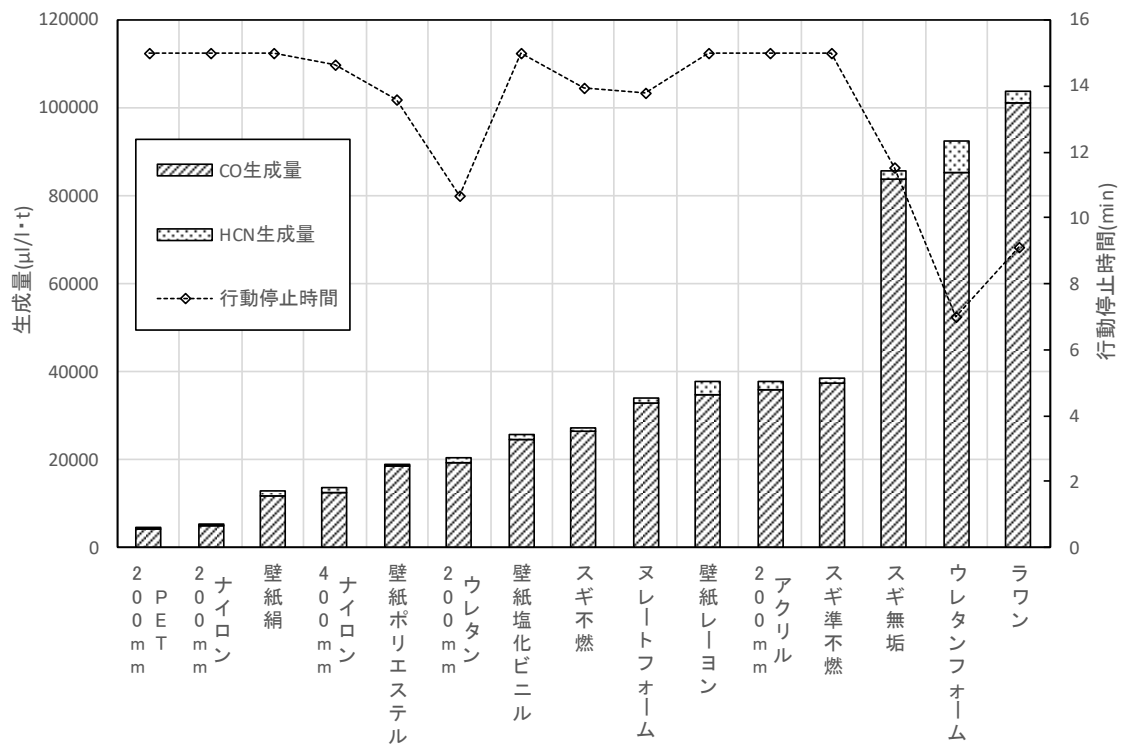


図 3.4.3 有害性ガス生成量と行動停止時間

3.4.3 マウスの行動

マウスの行動と毒性値の関係を図 3.4.4 に示す。マウスの行動については回転速度と平均行動停止時間を示す。回転速度は回転かごの半径を 5cm とし、ロータリーエンコーダーより得られた角速度から回転速度を計算したものである。

毒性値は ISO13344 の Levin の式に代入して L_{FED} 、ISO13751 の式に代入しての刺激的影響である X_{FEC} 、窒息的影響 X_{FED} をそれぞれ求めた。

発泡樹脂の結果を図 3.4.4(a)(b)に示す。 X_{FED} や L_{FED} の値についてはウレタンフォームの方が大きい結果となったが、 X_{FEC} は似た値となった。

壁紙の結果を図 3.4.4 (c)-(f)に示す。一番窒息性ガスの毒性高い壁紙の種類はレーヨンであった。しかし、刺激性ガスについては、ポリエステルや塩化ビニルの方が高い値であった。塩化ビニルについては、行動停止時間の 6.8 分近くでは 1 を超えた値であった。

樹脂についての結果を図 3.4.4 (g)-(k)に示す。樹脂はウレタンとアクリルが高い値を示した。 X_{FEC} についてはウレタンの方が高かったが、 L_{FED} や X_{FED} についてはアクリルの方が高い値であった。これは、アクリルの方が刺激性ガスよりも窒息性ガスである一酸化炭素やシアン化水素が多く生成したためである。木材の結果を図 3.4.4 (l)-(o)に示す。木材については無垢のスギとラワンが高い値であった。また、行動停止時間 6.8 分の際のラワンの L_{FED} は 1.01 であった。スギ準不燃とスギ不燃については大差なかったが、スギ不燃の方がより値が小さかった。これは薬剤による有害性ガスの発生の心配はないことが示唆されている。

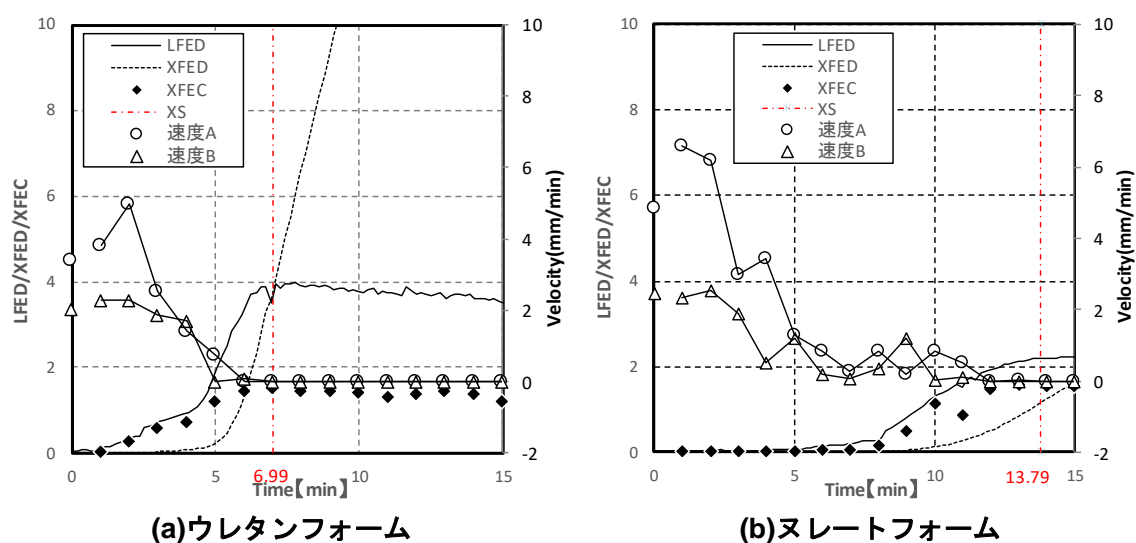
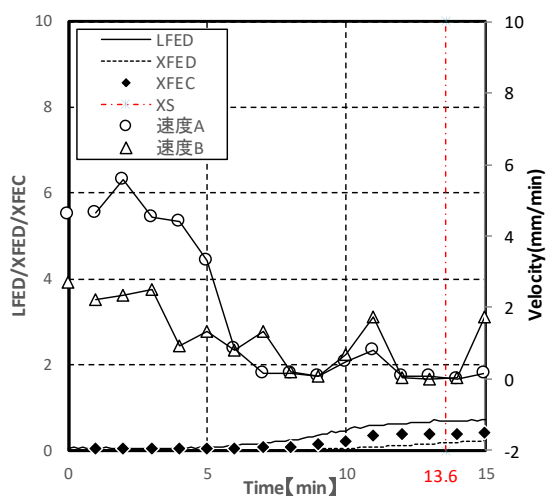
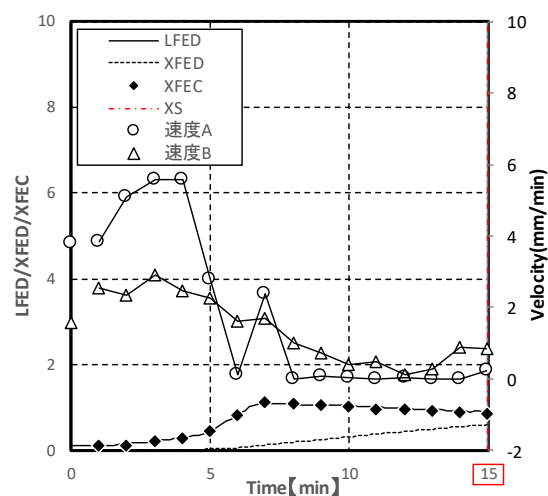


図 3.4.4 マウスの行動と毒性値 その1

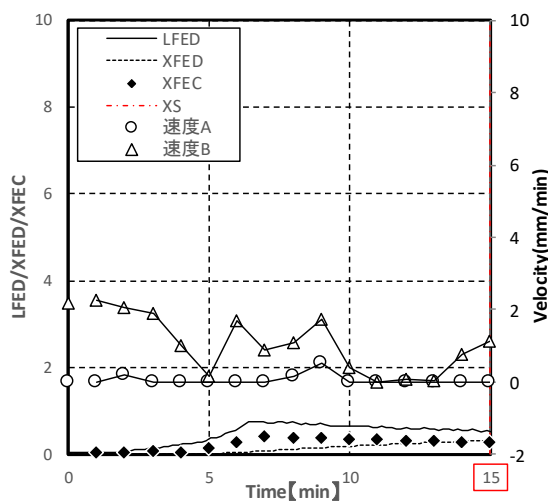


(c) 壁紙ポリエステル

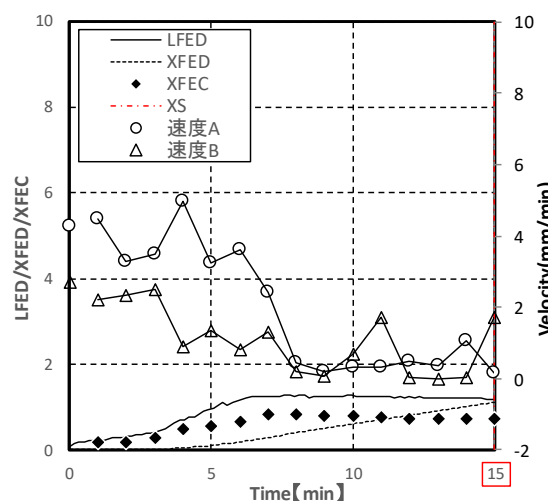


(d) 壁紙塩化ビニル

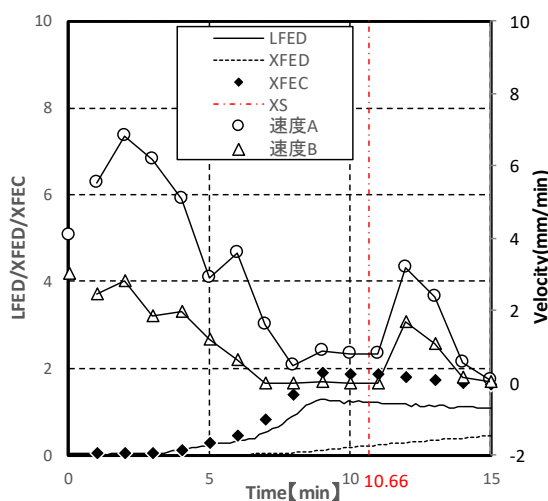
図 3.4.4 マウスの行動と毒性値



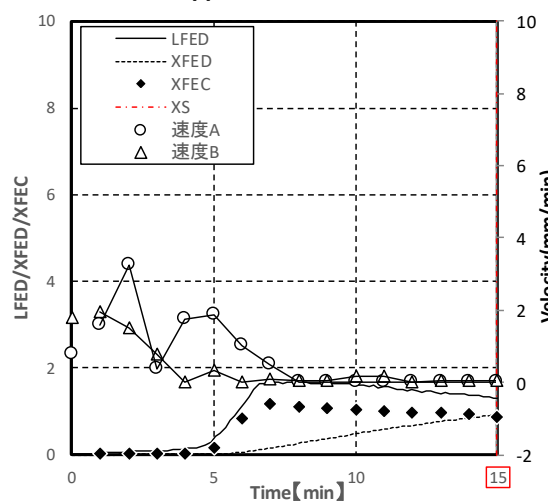
(e) 壁紙絹



(f) 壁紙レーヨン

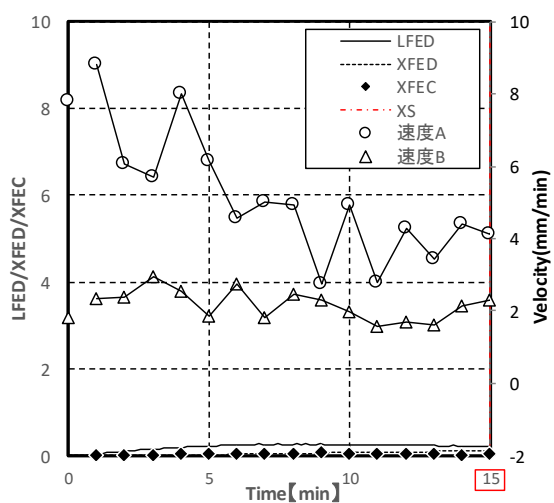


(g) ウレタン 200mm

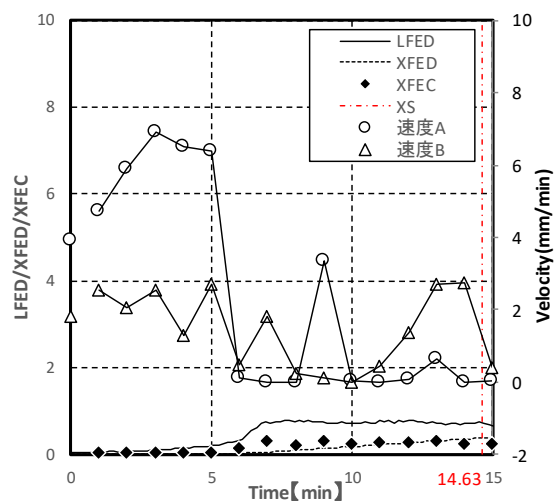


(h) アクリル 200mm

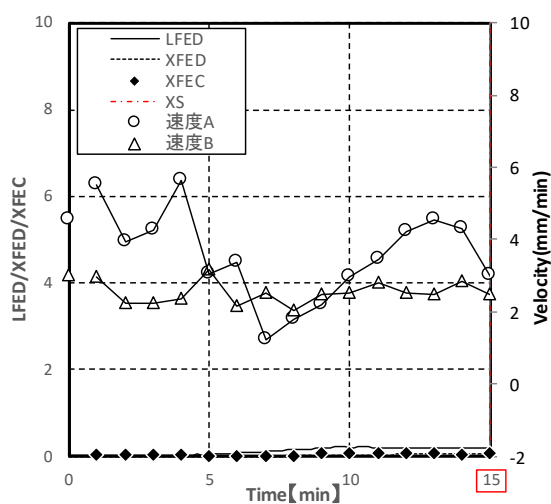
図 3.4.4 マウスの行動と毒性値 その2



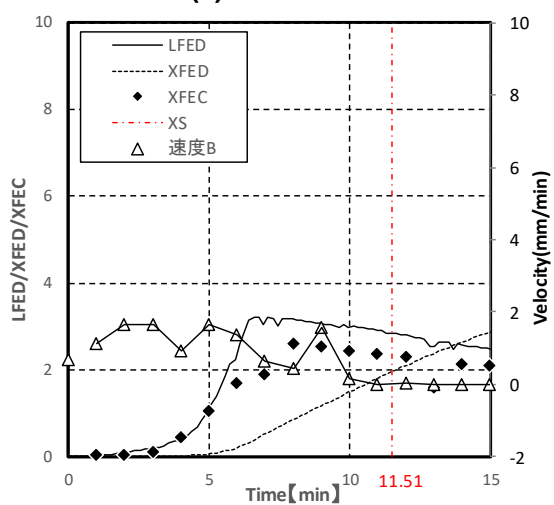
(i) ナイロン 200mm



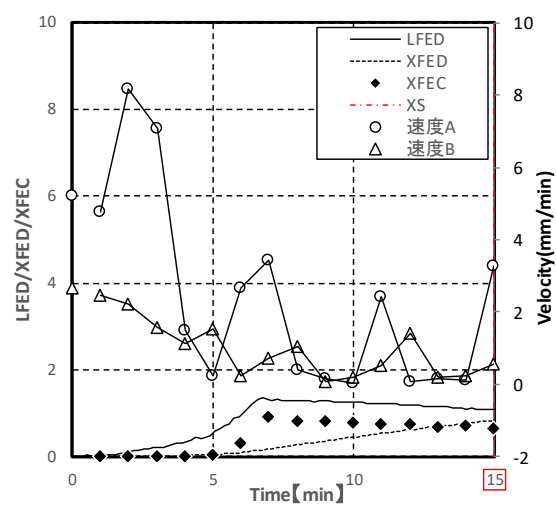
(j) ナイロン 300mm



(k) PET 200mm



(l) スギ無垢



(m) スギ準不燃

図 3.4.4 マウスの行動と毒性値 その3

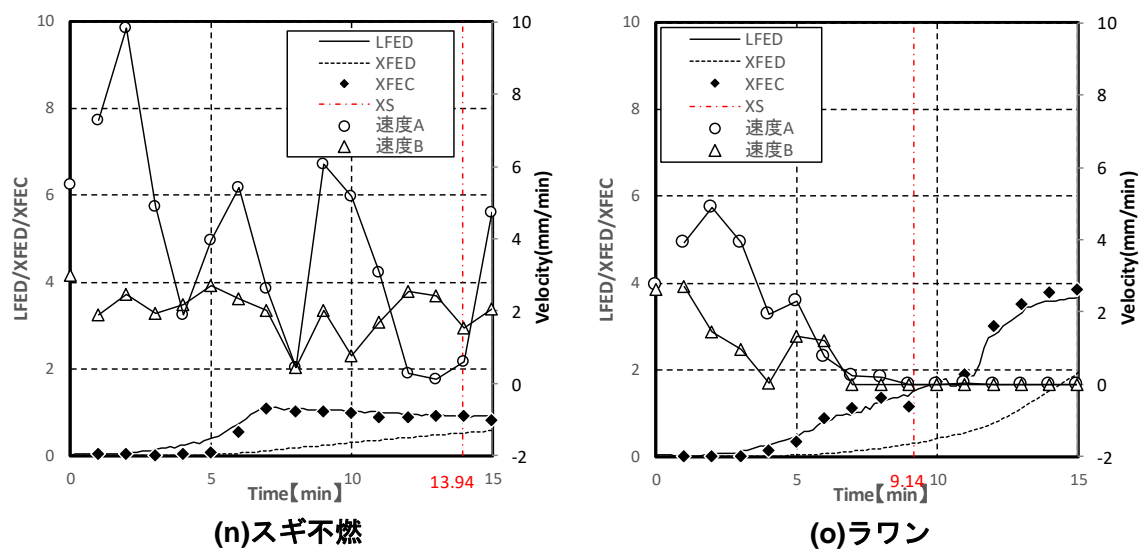


図 3.4.4 マウスの行動と毒性値 その4

L_{FED} 、 X_{FED} 、 X_{FEC} と平均行動停止時間 X_S の関係を図 3.4.5 に示す。図 3.4.5 から、 L_{FED} と X_{FED} は X_S と負の相関関係にあり、 X_{FEC} は X_S に対して一定値である。さらに、 L_{FED} と X_{FED} について相関係数を求めたとき、 X_{FED} は R^2 が 0.39 であるのに対し、 L_{FED} は 0.52 である、より関連性が高い結果であった。従って、 L_{FED} が一番マウスの行動停止時間の評価に適切であると考えられる。

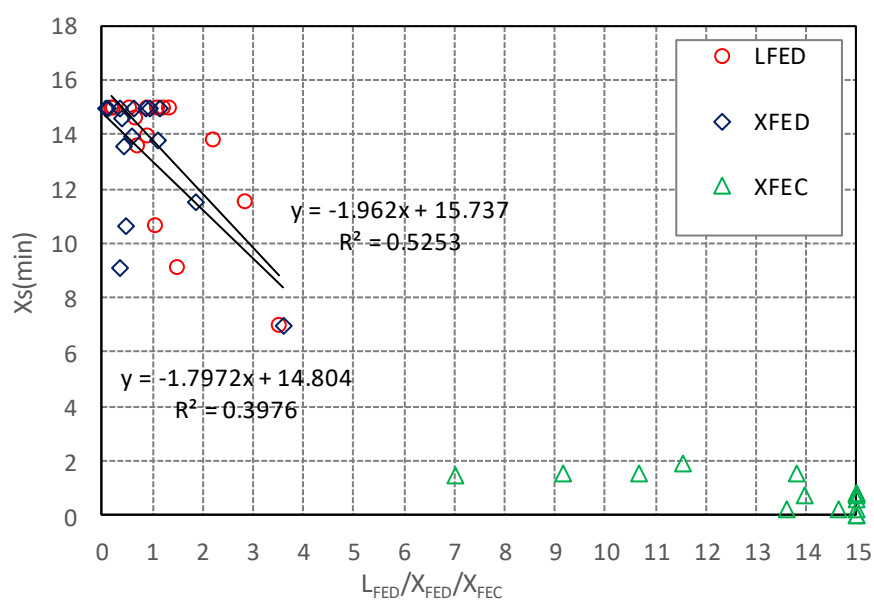


図 3.4.5 平均行動停止時間と毒性値の関係

L_{FED} と平均行動停止時間の関係を図 3.4.6 に示す。平均行動停止時間を L_{FED} から評価するために、 L_{FED} の 95%信頼区間および近似曲線を求め、同時に図 3.4.6 に示した。95%信頼区間とは、ガス有害性試験を複数回行った際に、うち 95%の結果が含まれる区間を意味する。

95%信頼区間の上限および下限の近似式はそれぞれ $y=9.83-1.59x$ 、 $y=21.62-2.32x$ であり、ガス有害性試験の基準値 6.8 分に対して、それぞれ 6.37 と 1.90 で交わる。

従って、 $L_{FED} \leq 1.90$ の時、平均行動停止時間は 95%の確率で 6.8 分以上であり、ガス有害性試験に合格でとなる。 $L_{FED} > 6.37$ の時、平均行動停止時間は 95%の確率で 6.8 分以下であり、ガス有害性試験に不合格となる。 $1.9 < L_{FED} \leq 6.37$ の時、マウスの行動停止時間が 6.8 分以上かどうかを推定することができない。

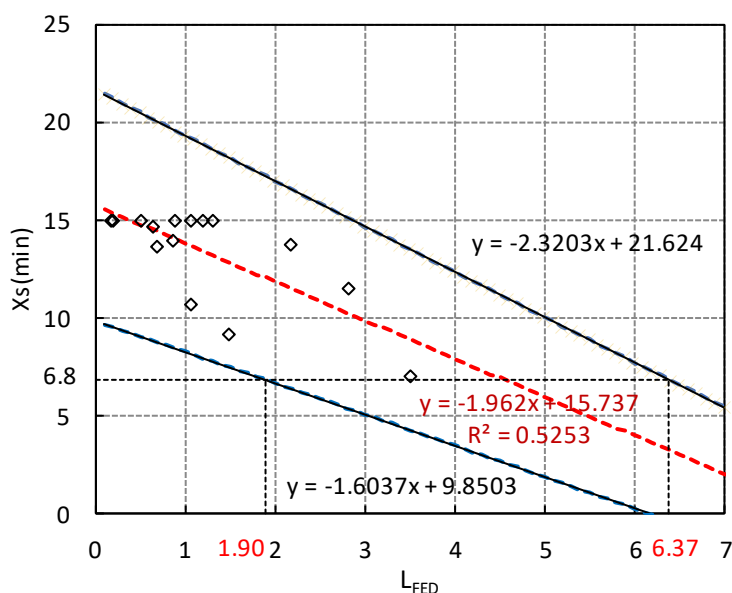


図 3.4.6 平均行動停止時間と L_{FED} の関係

ガス有害性試験の基準値である 6.8 分は赤ラワンを燃焼した際のマウスの平均行動停止時間である。建築材料の燃焼生成物が避難者に与える影響を評価するためには大別すると次の二つの方法がある。

- (1) 燃焼生成物のガス成分分析試験により成分ガスの種類と量を明らかにし、各成分ガスに関して既に明らかになっている情報を総合して生成物全体の有毒性を評価する方法。
- (2) 実験動物に材料の燃焼生成物全体を吸入させて動物の行動停止や死亡などの症状によってその毒性を判断する方法。⁶⁾

現行のガス有害性試験は(2)を使用した材料の相対的毒性を評価した試験であり、多くの材料から著しく毒性の大きい材料を見つけ出すことを目的としている。各種材料を一定条件下で燃焼させ、動物の発症時間を比較することによって評価を行い、天然材料(木材)との

比較により著しく毒性の高いものを排除するスクリーニング試験である。赤ラワンは制定された 1976 年頃に多く輸入材として使用されていた。⁷⁾

本研究では、マウスを用いた試験の数を削減するため、現行有害性試験の基準値である行動停止時間 6.8 分を同じく基準値とする。行動停止時間と燃焼生成物の関係を明らかにし、燃焼生成物の毒性値を計算することによって、動物実験の結果を予測し、可否の判断を行う。提案する代替手法案を次節に示す。

3.5 代替手法案の提案

マウスを用いてガス有害性試験を実行し、燃焼ガスのガス成分分析を行い、計算した毒性値とマウスの平均行動停止時間の比較を行うことにより、3.4.3 節から L_{FED} の値から行動停止時間のある程度予測することができることが明らかになった。しかし、丸山らの研究⁵⁾からも木材では刺激性ガスを考慮しなくても平均行動停止時間の予測が可能だと示唆されたが、全ての試験体に対してマウスの行動停止時間の予測が難しい。従って、本研究では動物実験を削減する方法を提案し、図 3.5.1 に示す。

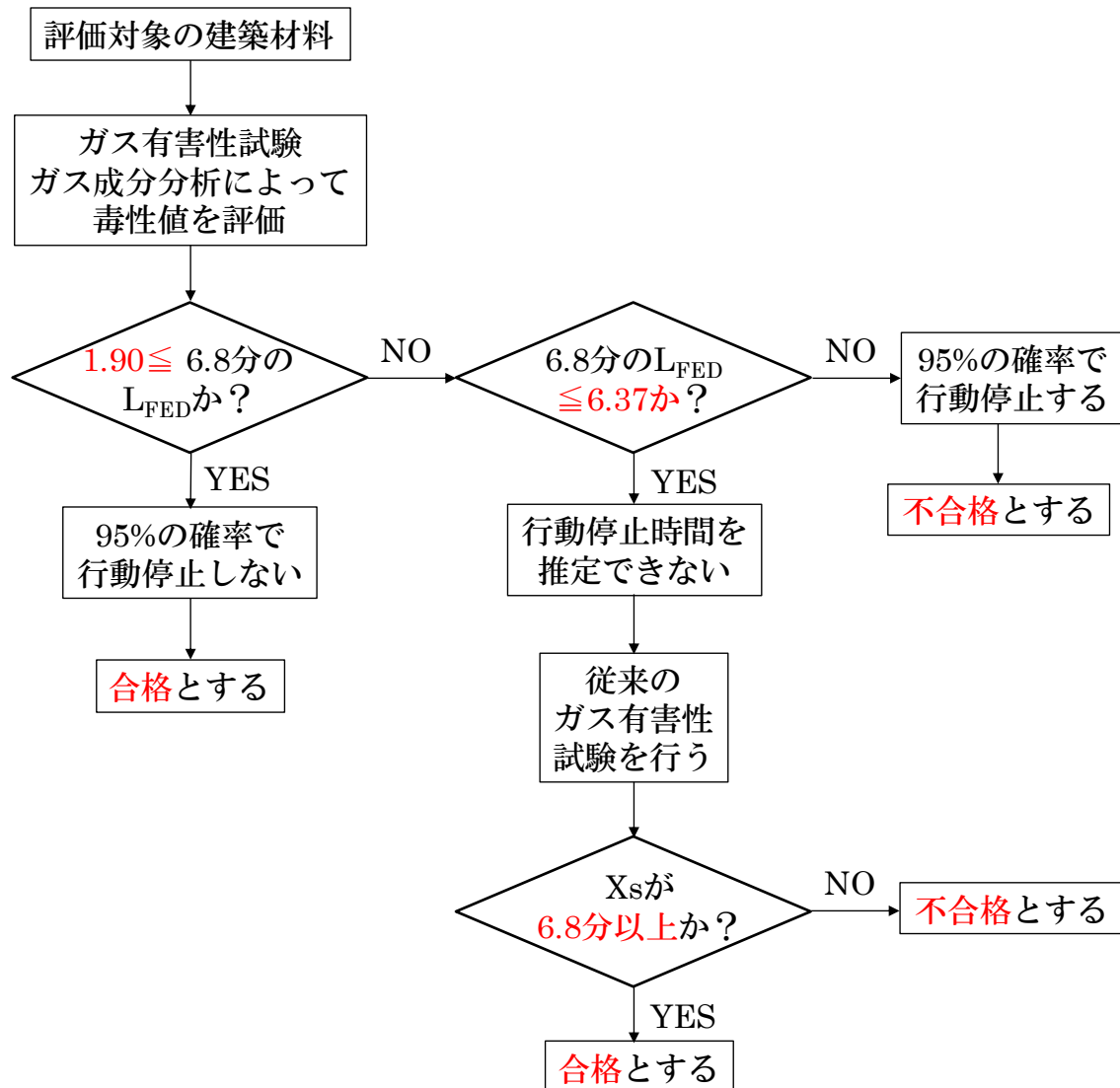


図 3.5.1 提案する評価法の手順

また、ガス成分分析による毒性評価では予め考慮しなかったガス成分の毒性を無視してしまう恐れがあり、現在使用している毒性モデルよりも毒性値が大きくなる可能性がある。従って、燃焼生成ガスが全く予測できない試験材料に関しては、現行のマウス試験で評価すべきである。

3.6 代替手法案の妥当性について

提案した代替手法案に対して、妥当性を検討するために、他のガス有害性試験装置で行った実験結果に対して検証を行った。ガス成分分析の結果を使って毒性値 L_{FED} を計算し、6.8 分際の L_{FED} の値と平均行動停止時間の比較を行った。図 3.6.1 に比較の結果を示す。試験体および実験結果の一覧を表 3.6.1 に示す。

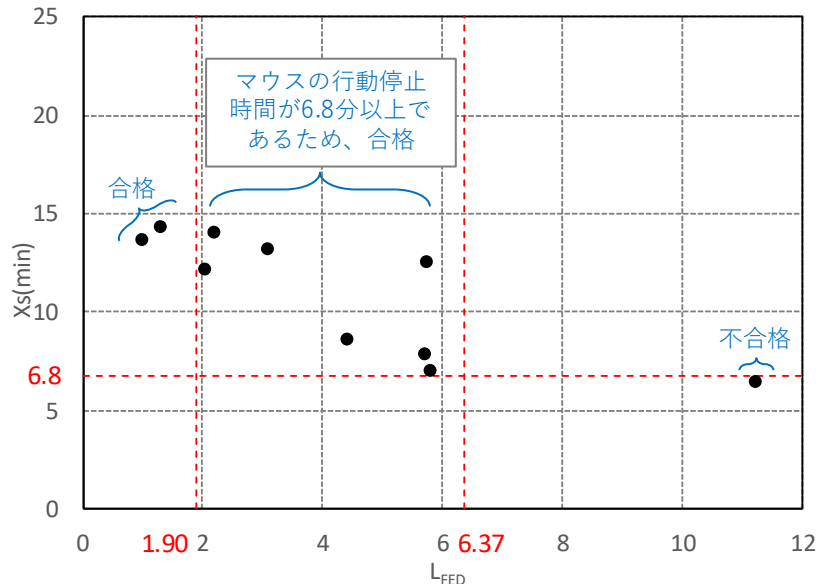


図 3.6.1 平均行動停止時間と L_{FED} の関係

	ウレタン樹脂 200mm	ウレタン樹脂 400mm	アクリル樹脂 200mm	アクリル樹脂 400mm	ヒノキ	ラワン	スギ	スギ準 不燃 処理	スギ 不燃 処理	スギ 難燃 処理
平均行動 停止時間	13.74	14.04	13.19	6.5	7.9	7.07	8.63	12.59	14.39	12.18
6.8分時の L_{FED}	0.98	2.18	3.07	11.2	5.7	5.79	4.38	5.71	1.28	2.03

表 3.6.1 試験体およびガス有害性試験の実験結果

図 3.6.1 と表 3.6.1 から、実験開始から 6.8 分際の L_{FED} 値が 1.90 以下であるウレタン樹脂 200mm と杉不燃処理の平均行動停止時間は 13.74 分と 14.39 分であり、いずれも合格である。実験開始から 6.8 分際の L_{FED} 値が 6.37 より大きい試験体アクリル樹脂 400mm の平均行動停止時間は 6.5 分であり、不合格である。その他の試験体の 6.8 分際の L_{FED} 値は 1.90 より大きく、6.37 以下であったが、行動停止時間はいずれも 6.8 分よりも大きく、合格である。

以上のことから、提案したガス有害性試験の代替手法案は他のガス有害性試験装置で行われた実験結果に対しても適合している。

削減率については、ガス有害性試験装置その 1 の実験結果では、試験体 15 体に対して 12 体（杉、ヌレート、ウレタン以外）、ガス有害性試験装置その 2 の実験結果では、試験体 10 体に対して 3 体、ガス成分分析の結果から合否を判断することができた。試験体の種

類によって異なる傾向を見せた。樹脂や壁紙はガス成分分析の結果のみで判断できる傾向にあるが、木材やフォーム材は高い濃度で多くの種類の有害性ガスが生成し、行動停止時間にばらつきが大きいため、マウスを用いたガス有害性試験による判断が必要である結果となった。

3.7 回転速度と X_{FEC} の比較

マウスの回転速度と有害性ガスの刺激性影響を評価した X_{FEC} を比較し、刺激性ガスが行動速度に与えた影響を調べた。有害性ガスの刺激影響を受けて、回転速度の低下が予想される。速度と X_{FEC} の関係を図 3.7.1 に示す。図(a)に試験体ごとの結果を示し、図(b)に試験体全体の結果および近似式を示す。図(b)に単位毒性値 0.1 あたりの平均速度および最大速度を示し、それぞれの近似式を示す。

図(a)より、 X_{FEC} が増加するにつれ、速度が低下する傾向にあることが示されている。さらに、 X_{FEC} 1.0 以上に対してウレタン 200 以外の試験体ではほとんど回転速度が 0 になった。

図(b)では全ての試験体の結果に対し近似式を示し、 X_{FEC} と回転速度の関係を下に示す式

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad \dots(1)$$

(1)に従って相関係数 r の計算を行った。

n : 2 変数データ(x,y)の総数

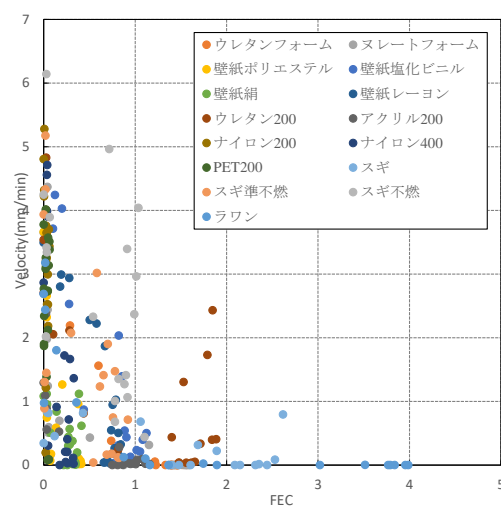
x_i, y_i : 個々の数値

\bar{x}, \bar{y} : それぞれの平均値

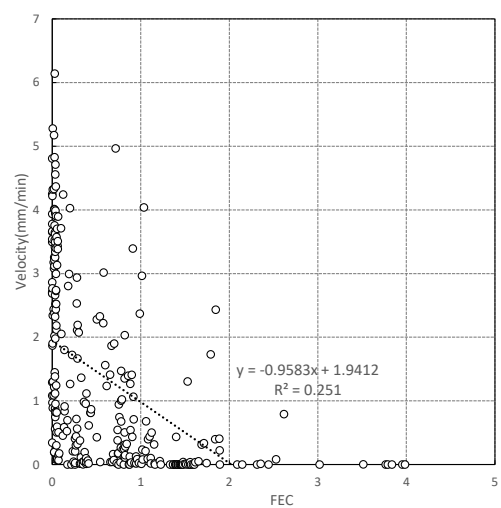
全試験体の X_{FEC} と回転速度の相関係数は-0.56 であり、負の相関であった。FEC 値が小さいときのマウスの行動は個体による違いが大きく、ばらつきの大きい結果となっている。ばらつきを小さくするため、単位毒性値 0.1 あたりの平均速度および最大速度を求め、図(b)に示した。

式(1) から相関係数を求めると、それぞれ-0.59、-0.69 となり、より相関性の高い結果となった。また、グラフから直線近似式を求めると、平均速度に対して $y=-0.5013x+1.3383$ となり、最大速度に対して $y=-1.0202x+3.1237$ となった。

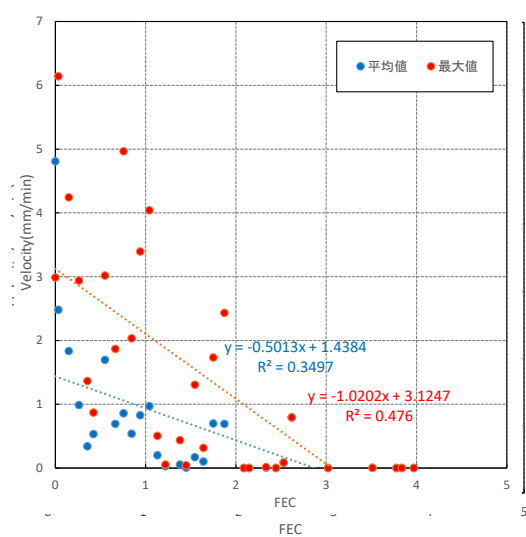
これらのことから、 X_{FEC} が 1 増加するのに対し、マウスの速度はおおよそ 0.5～1.02 mm/min 減少することが考えられる。しかし、これは刺激性ガスだけでなく、窒息性ガスの影響も含まれているため、注意が必要である。



(a)試験体別



(b)全試験体



(c) 平均値および最大値

図 3.7.1 有害性ガスの刺激性影響と回転速度

3.8 まとめ

マウスに有害性ガスを曝露しながら現行のガス有害性試験を実行し、FTIR を使って得られた結果から毒性値を計算し、マウスの行動停止時間と比較することにより、一酸化炭素生成量だけではわからなかったマウスの挙動と生成ガスの関係を評価することができた。さらに、以下のことが明らかになった。

1. FTIR を使って生成ガスの濃度を連続測定することが技術的に可能である。
2. 動物由来の毒性値 L_{FED} を計算し、行動停止時間との関係を示した。
3. L_{FED} を使った動物実験を削減するガス有害性試験の代替手法を提案した。
4. X_{FEC} と回転速度を比較することにより、刺激性ガスがマウスの回転速度に与える影響を明らかにした。

3.9 今後の課題

ガス有害性試験に対し、マウスの削減案を提案したが、木材やフォーム材等については依然マウスを使ったガス有害性試験を行う必要がある。削減できる範囲を広げる必要があり、木材やフォーム材について、行動停止時間と有害性ガスの関係を調べ、毒性値から行動停止時間を予測することによって、代替手法を考案する予定である。

参考文献

- 1) 法第2条第九号（不燃材料）4.9.3 ガス有害性試験・評価方法
- 2) 石原茂久: 火災時の煙と有害性ガス, 木材研究・資料, 第16号, 1981
- 3) 仲谷 一郎: 建築火災における毒性ガスの発生メカニズム, 火災 Vol.52 No.3, 2002.6
- 4) 東京消防庁: 火災による死因の生理学的検討結果報告書, 1992.4.3
- 5) 丸山徹, 藤本郷史, 吉岡英樹, 成瀬友宏, 野口貴文, 棚池裕, 趙玄素, 長谷善博, 早川哲哉, 土橋常登: 建築材料の燃焼生成ガスの FTIR 分析による毒性評価に関する基礎的研究 その1 ガス有害性試験におけるマウスの行動停止時間と FTIR 分析による毒性評価の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集、防火, pp.203-203
- 6) 福田泰孝, 遊佐秀逸: 建築材料の燃焼時におけるガス有害性に関する一考察ーガス有害性試験における木質系材料の性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 2006 年 9 月
- 7) 岸谷孝一, 遊佐秀逸: 建築材料の燃焼時における有害性に関する研究: 第12報・燃焼生成物からみた各種材料の相対的毒性評価: 防火, 学術講演梗概集. 構造系 53, 2121-2122, 1978-09

第4章 燃烧条件と燃烧生成物の関係

耐火建築物の一室で火災が発生した場合、火災室の区画条件や可燃物の条件により、火災性状はおおむね決定される。すなわち、区画の開口部の大きさ、区画の大きさ、区画を構成する壁、床、天井の材質、そして区画へ持ち込まれる可燃物の量やその表面積などにより火災の性状が左右される。このような囲われた空間で進展する火災は区画火災である¹⁾。区画火災の成長過程を時間と火災室の温度の関係を図4.1.1に示す²⁾。従って、建築材料の燃烧生成ガスの有害・有毒性を把握し、実火災時の危険性を評価するためには、区画火災に対応した様々な燃烧条件下における材料の燃烧や熱分解特性を明らかにする必要がある。本研究では、実火災時にいて避難者に与えられる有害性ガス影響を調べるために、加熱温度および供給空気量を自由に設定できるチューブ炉実験装置(ISO197001)を用いて各燃烧条件に対して実験を行い、酸素濃度計およびFTIRでガス成分分析を行い、燃烧条件と各ガス成分の生成量を比較した。ガス成分分析の結果を用いて計算した有毒値と燃烧条件を比較し、整理した。さらに、より簡単な実験手順および燃烧環境を得るため、同じく燃烧条件を設定できる簡略チューブ炉(NFX70-100)を用いて、加熱実験を行い、ISOチューブ炉と比較を行った。

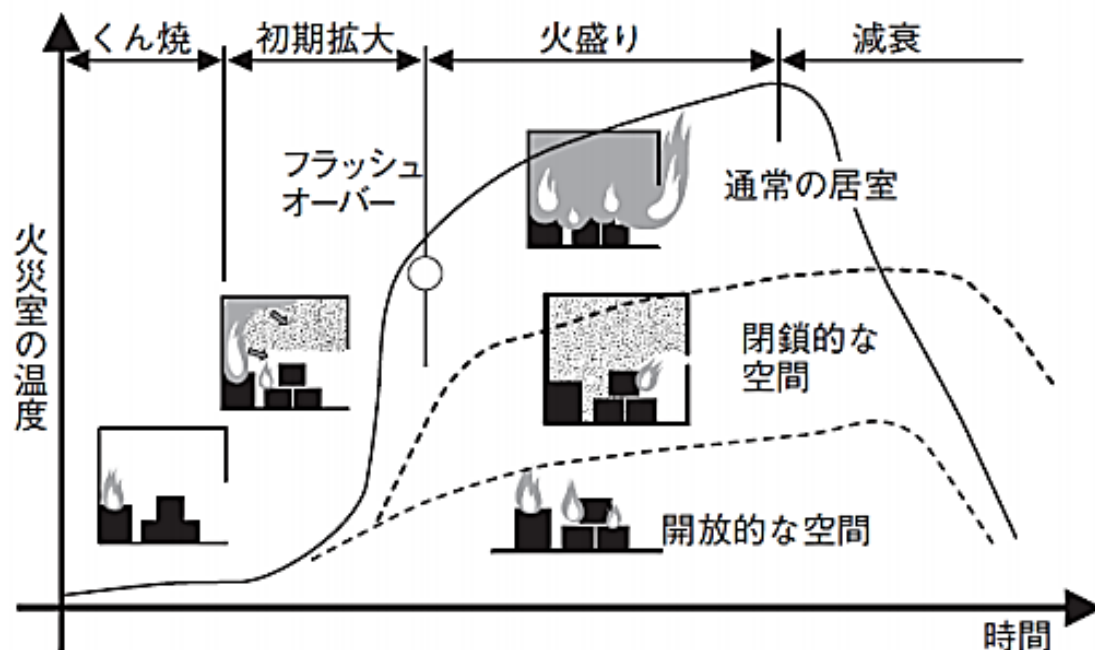


図 4.1.1 区画火災の進展過程

4.1 ISO チューブ炉試験について

4.1.1 実験概要

4.1.1.1 試験装置

ISO19700 に定められているチューブ炉試験装置を用いて燃焼実験を行い、FTIR でガス成分分析をした。試験装置の概要および概略図を写真 4.1.1 および図 4.1.2 に示し、加熱炉内を写真 4.1.2 に示す。

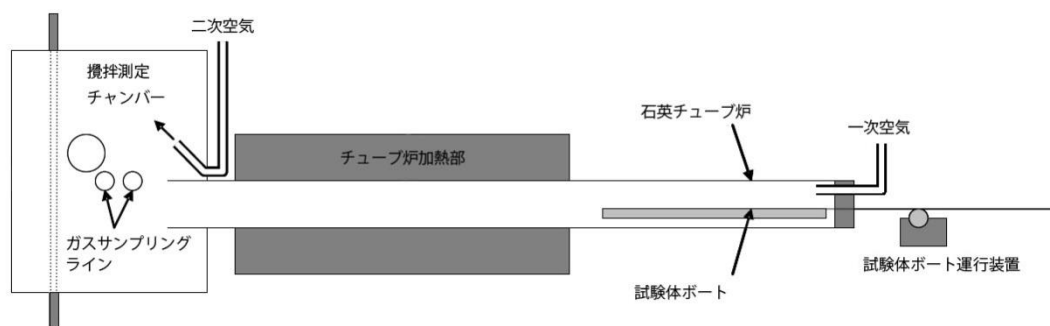
チューブ炉試験は、空気を送りながら試験体ボードを移動させ、一定の温度で試験体を加熱する試験である。燃焼条件に応じて空気量と加熱温度を変えて試験することができる。試験体ボードは長さ 800mm、加熱炉は長さ 600mm であり、一次空気を送りながら加熱を行い、生成した燃焼生成物は、攪拌測定チャンバーで二次空気を送入して希釈してサンプリングし、酸素濃度計 ORIBA で CO、CO₂、O₂ の濃度、FTIR で ISO13344 に挙げられる 11 種類(CO、CO₂、NO₂、SO₂、NH₄、HCL、HF、CH₂O、HCN、HBr、C₄H₄O)の濃度をそれぞれ測定した。



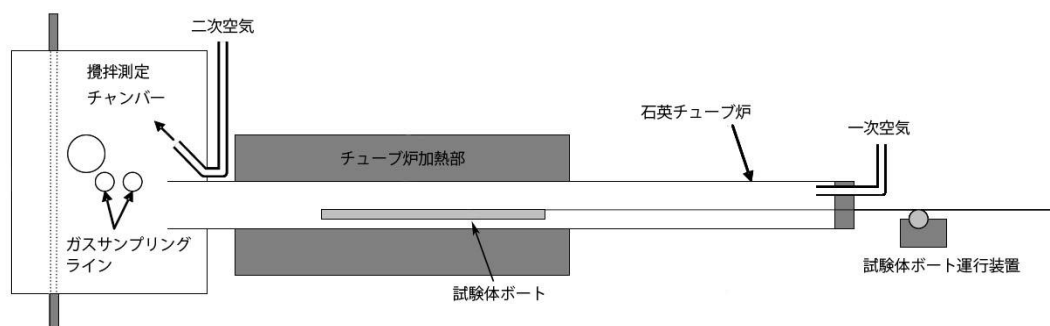
写真 4.1.1 チューブ炉試験装置



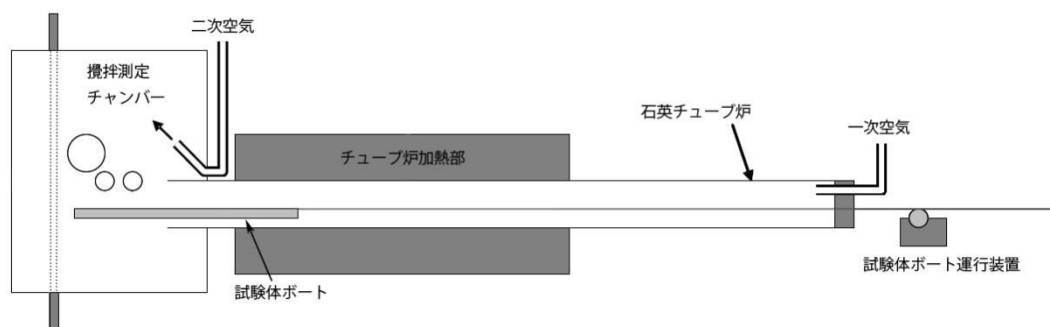
写真 4.1.2 チューブ炉試験装置加熱炉内



(a)加熱開始前



(b)加熱試験中



(c)加熱試験終了時

図 4.1.2 チューブ炉試験装置概略図

4.1.1.2 試験体

試験体は、試験体ボードに均一に設置できるよう、ペレット状のまたは小片形状のものを
用いた。PVC(ポリ塩化ビニル)、木材(スギ; 無処理)、低密度ポリエチレン(LDPE)、アクリ
ル樹脂(PMMA)、ナイロン 6,6、の計 5 種類とした。

木材は 10mm 角の小片に加工し、PVC、LDPE、PMMA、ナイロン 6,6 は 4mm 前後の粒子
状にして実験を行った(写真 4.1.3)。

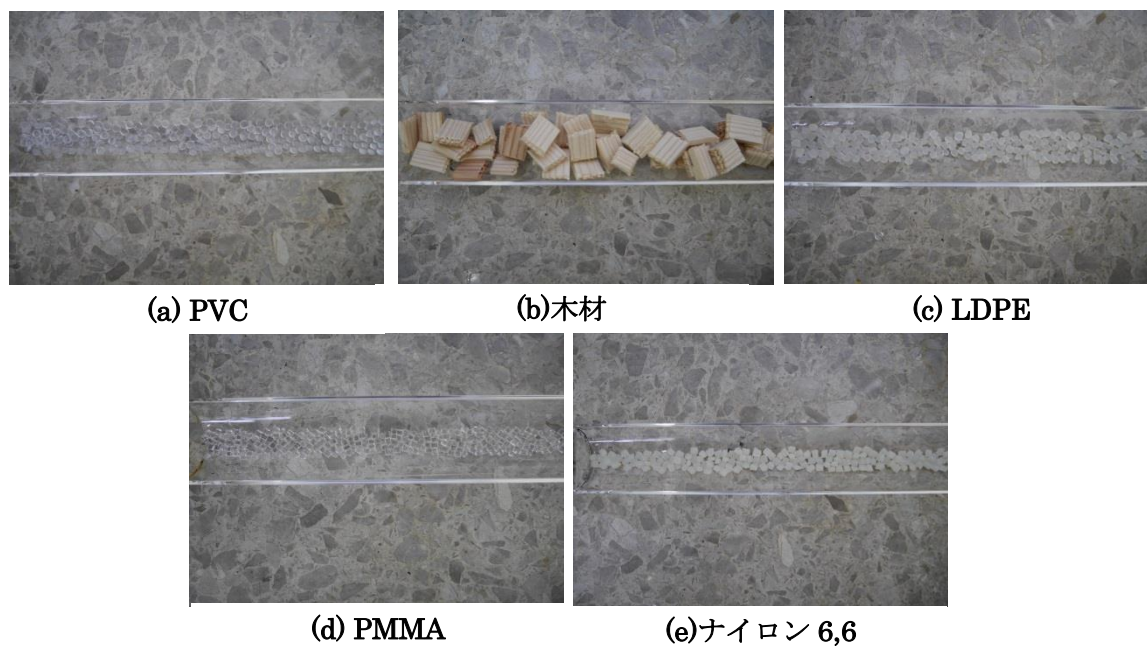


写真 4.1.3 試験体

4.1.1.3 実験条件

ISO19706 に従い火災シナリオに対して表 4.1.1 に示す 4 種類の火災進展段階に対応する条
件下で実験を行った。燃焼条件は、火災進展段階に対応して、くん焼、燃料支配型有炎燃焼、
酸素欠乏状況下の区画火災、フラッシュオーバー後の盛期火災の 4 つとした²⁾。本研究で用
いた火災進展段階と区画火災の進展過程の対応関係を図 4.1.3 に示す。

表 4.1.1 実験条件

進展段階	加熱温度	一次空気	二次空気
	℃	L/min	L/min
くん焼	350	2	8
有炎燃焼 (燃料支配)	650	10	40
酸素欠乏状況下の区画火災	650	3.2~3.6※	46.4~46.8
盛期火災(F.O.後)	825		

※試験体それぞれに対して有炎燃焼段階の酸素消費量より算出して決めた値を用いた。

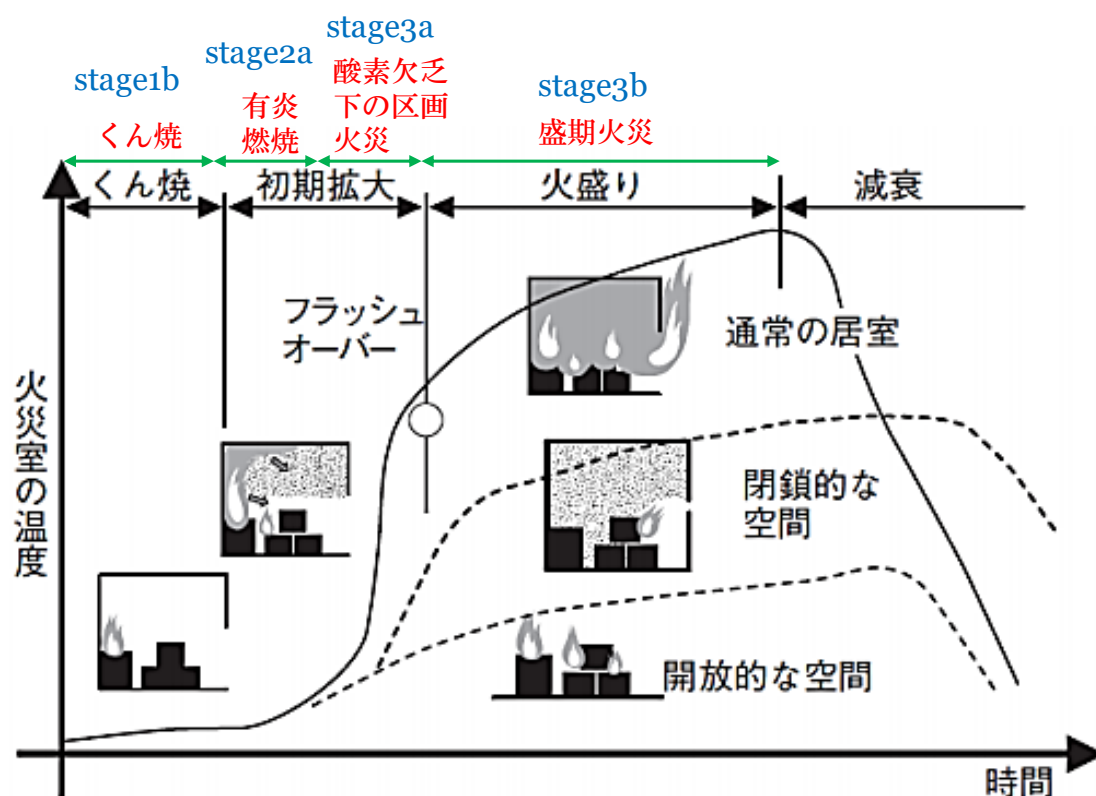


図 4.1.3 区画火災の進展段階と実験条件

すべての実験はボードの移動が停止してからも実験を継続し、試験時間 30 分になるように測定をした。

試験装置の加熱炉の校正は以下の手順で安定した加熱温度が十分な区間存在することを確認した。

- 1) 加熱炉電気ヒーターの制御温度を 680°C に設定し、一次空気を流さずに熱電対で加熱炉内の温度を 25mm 間隔で測定する。
- 2) 加熱炉内の最大温度が $650 \pm 10^{\circ}\text{C}$ であることを確認し、異なる場合は制御温度を変更する。
- 4) 2) の条件が満たされた場合、最大温度となる点との距離が 125mm から 250mm 間に 100°C 低い点が存在する。使用した試験装置では図 4.1.4 に示すように制御温度 614°C の時に求められる条件が満たされた。

以上のことを 350°C 、 825°C についてそれぞれ行った。さらに、一時空気が流れた際の温度変動を考慮し、最大温度から気流の下流方向に $75 \pm 10\text{mm}$ の位置の温度が実験温度 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ になるよう、制御温度を調整して実験を行った。

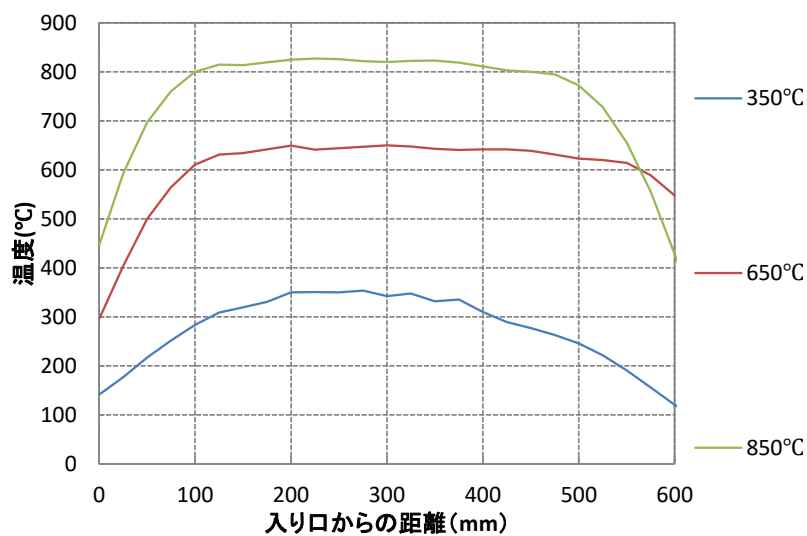


図 4.1.4 測定温度

加熱温度(T_{run})それぞれに対する制御温度については次の条件を満たすことを確認しながら決めた。

- 1) 実験測定時と同じ空気量を流し、熱電対で炉内温度を測定した。
- 2) 炉内の最大温度が $T_{\text{run}} \pm 10^\circ\text{C}$ 以内となるように制御温度を設定した。

試験体を送入して加熱し、燃焼反応で炉内温度が上昇するが、それを制御しなかった。火災ステージごとの実験条件を示し、それぞれ説明する。

(a)stage1b くん焼

有炎燃焼への移行段階であり、小さな火種が燐る状態である。

試験体質量は 25mg/mm、加熱温度は 350℃とした。一次空気は 2L/min とした。

(b)stage2a 有炎燃焼(燃料支配)

火種は成長し、壁やカーテンに延焼して燃焼が拡大し、フラッシュオーバーに至り、煙が充満した状態である。

加熱温度は 650℃とし、一次空気 10L/min、二次空気 40L/min とした。

また、酸素消費量と質量損失に基づき、以下の手順で stage2a の燃焼条件に満たすよう確認をした。

$$D_{O_2} = 20.95 - M_{O_2} \dots\dots(式1)$$

$$2.1\% \leq D_{O_2} \leq 3.14\%, \phi \leq 0.75\dots\dots(式2)$$

$$\phi = \frac{\dot{m}_{loss} \times \psi_{O_2}}{O} \dots\dots(式3)$$

D_{O_2} : 酸素消費量[%]

M_{O_2} : チャンバー内酸素濃度

ϕ : 当量比

\dot{m}_{loss} : 試験体の質量損失比

ψ_{O_2} : 酸素消費量

O : 酸素供給比

$$O = P \times 0.2095 + 1330 g / m^3 \quad P = \text{一次空気量}$$

式(2)を満たすとき、空気が十分にあり、完全燃焼の条件を満たすと考えられる。

式(2)を満たさない場合、燃焼速度、試験体質量を変えて実験を繰り返し、条件に満たすようにする。

本実験では表 4.1.2 に示す条件下で式(2)が満たされることを確認し、実験を行った。

表 4.1.2 stage2a の実験条件

	試験体質量	燃焼速度	一次空気	二次空気	加熱温度
	mg	mm/min	L/min	L/min	℃
PVC	39.6	40	10	40	650
木材	39.6	60			
LDPE	19.8	40			
PMMA	19.8	40			
ナイロン6,6	19.8	40			

(c)stage3 盛期火災

火災温度が急激に上昇し、煙と有害性ガスが多く生成し、隣接空間まで延焼が拡大し、躯体の崩壊が始まる状態である。

試験体質量および燃焼速度は stage2a と同じ条件にした。加熱温度は 650℃(3a)、825℃(3b)にし、一次空気および二次空気は stage2a の実験結果に基づき、以下の手順により決めた。

$$P = y_{O_2} \times 125 dm^3 / min$$

$$y_{O_2} = \frac{D_{O_2}}{100}$$

P : 一次空気量

y_{O_2} : モル分率

$P \leq 3.2 dm^3 / min$ の時は $P = 3.2 dm^3 / min$ とする。

これにより $\phi = 2.0 \pm 0.2$ の状態を作り出すことができる。

stage3 の実験条件を表 4.1.3 に示す。

表 4.1.3 stage3 の実験条件

	試験体質量	燃焼速度	一次空気	二次空気	加熱温度	
	g	mm/min	L/min	L/min	3a	3b
木材	39.6	60	3.2	46.8	650	825
PVC	39.6	40	3.2	46.8		
LDPE	19.8	40	3.8	46.2		
PMMA	19.8	40	3.4	46.6		
ナイロン6,6	19.8	40	3.2	46.8		

4.1.2 実験結果

各試験体について、燃焼条件別の有害性ガスの生成量を整理した。さらに、有害性ガスの生成量について、主要生成ガスの種類について整理し、火災進展段階ごとに比較を行った。

4.1.2.1 ポリ塩化ビニル(PVC)

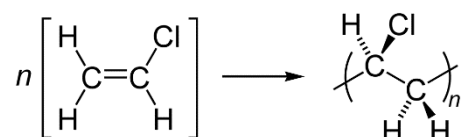
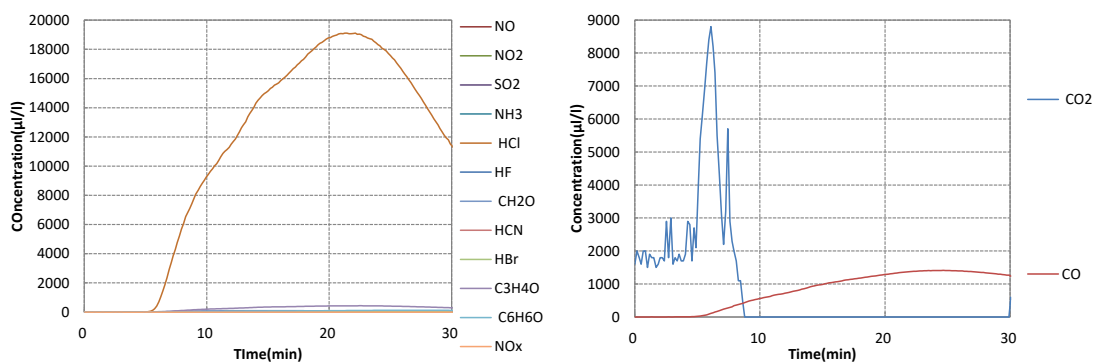


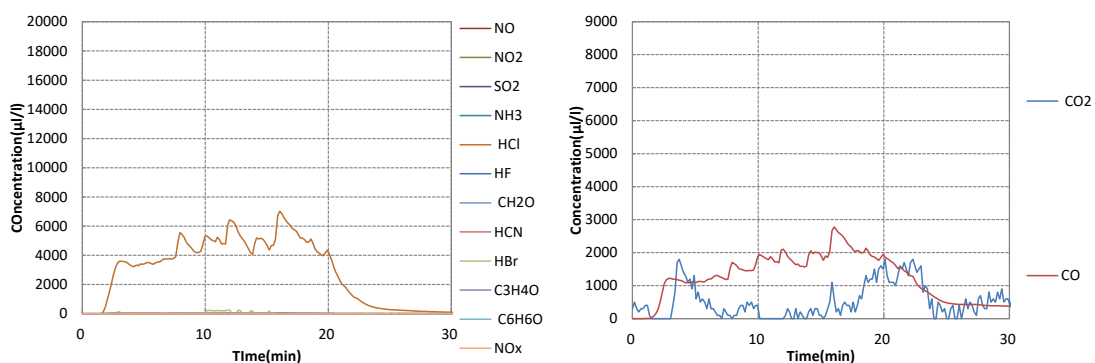
図 4.2.1 にポリ塩化ビニルのガス成分分析結果を示す。ポリ塩化ビニルは一般的な合成樹脂の一つであり、塩化ビニルを重合したものである。日本では多くの建築材料に使用されており、電線被覆・壁紙・サッシ・タイルカーペット・防水シートなどが挙げられる³⁾。

ポリ塩化ビニルにおいては、stage1b、stage2a、stage3a ではいずれも HCl が生成した。stage1b では低い濃度、stage3a では低い濃度であったことから、ポリ塩化ビニルは火災の早い段階の比較的低い温度で脱塩化水素反応により、刺激性ガスの HCl を生成すると考えられる。stage1b では、8 分までは CO₂ が生成していたが、8 分以降は CO が生成し、CO₂ の濃度が下がった。これは、試験体の熱分解により酸素が減少したことが原因として考えられる。Stage3b では 10 種類の有害ガスに関しては CO₂ 以外のガスはほとんど計測されなかったが、CH₄ や NO_x が多く生成した。

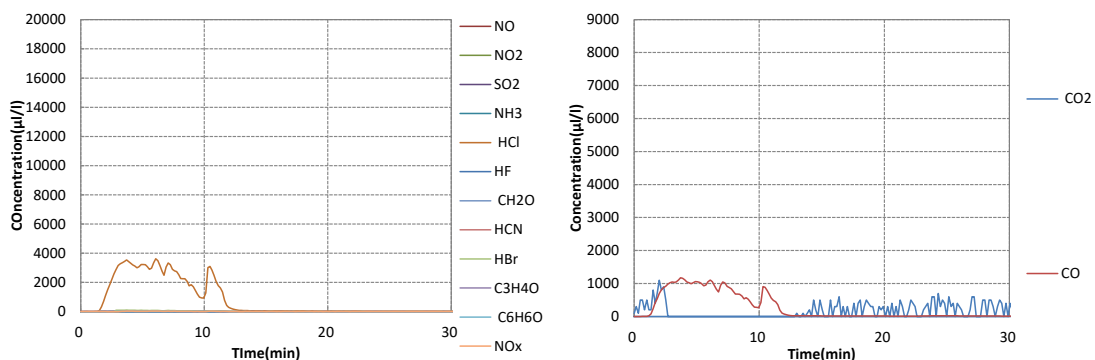
図 4.2.2 に主要生成ガスの種類ごとのガス成分分析結果を示す。ポリ塩化ビニルにおいては、C₃H₄O、HCl、C₆H₆O が多く生成した CO は stage2a で一番多く生成し、他のガスは stage1b で一番多く生成した。Stage1b では、CO 以外のガスが、加熱終了後も生成した。



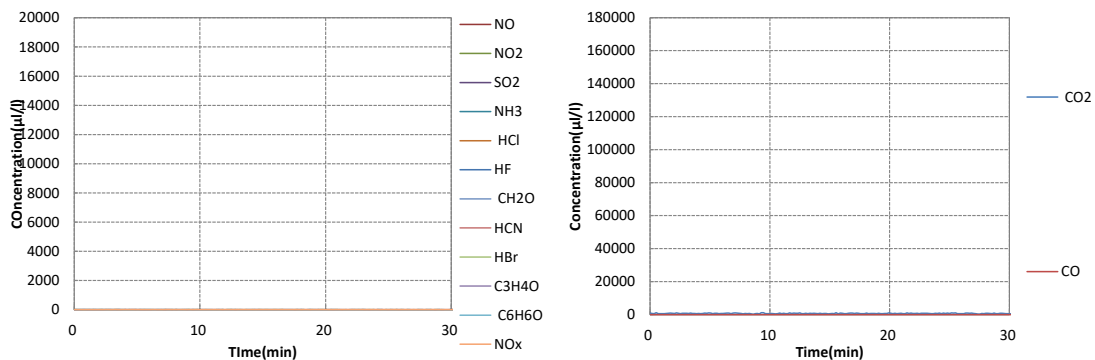
(a) stage1b



(b) stage2



(c) stage3a



(d) stage3b

図 4.2.1 ポリ塩化ビニルのガス成分分析結果

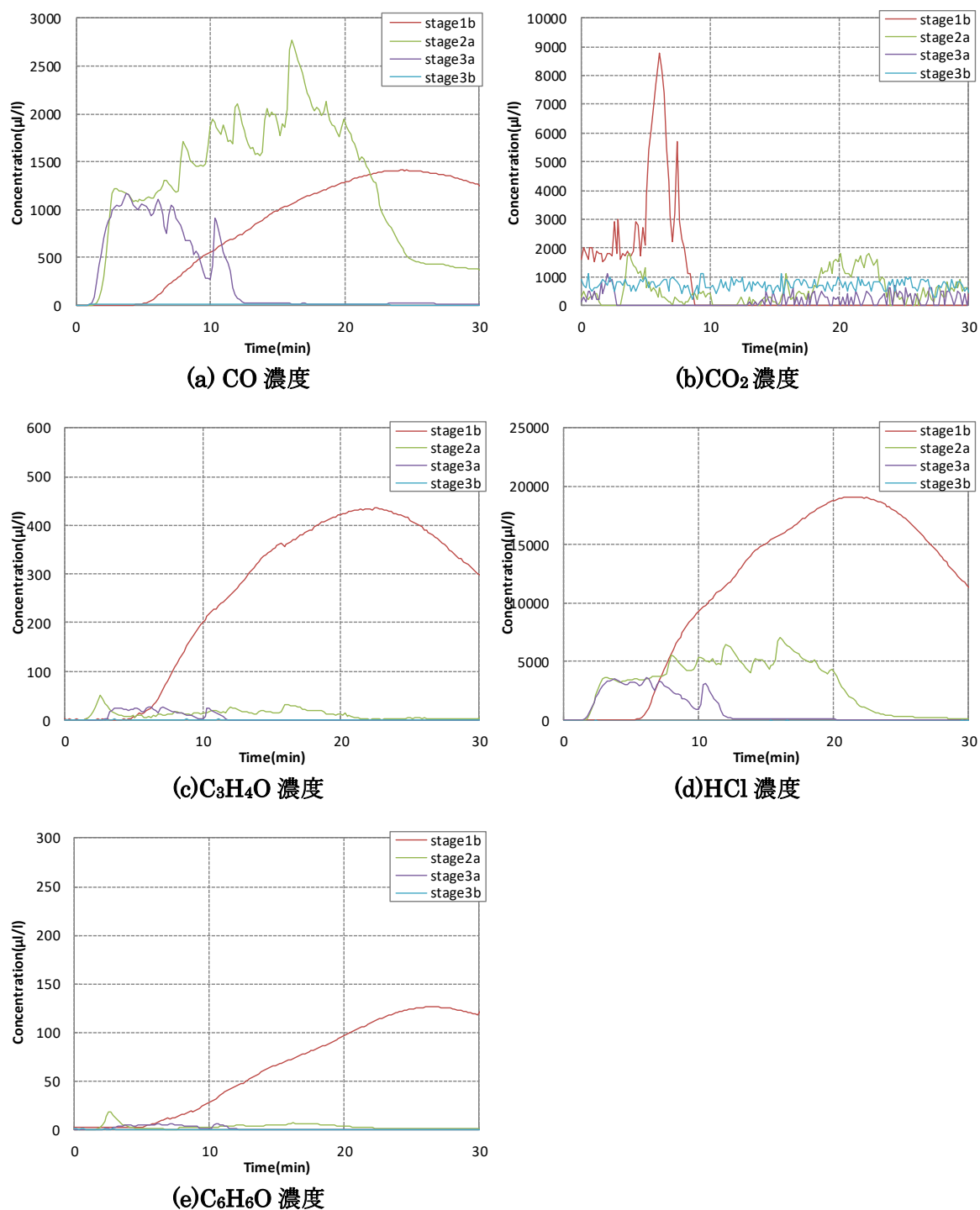


図 4.2.2 ポリ塩化ビニルの有害性ガスの種類ごとの結果

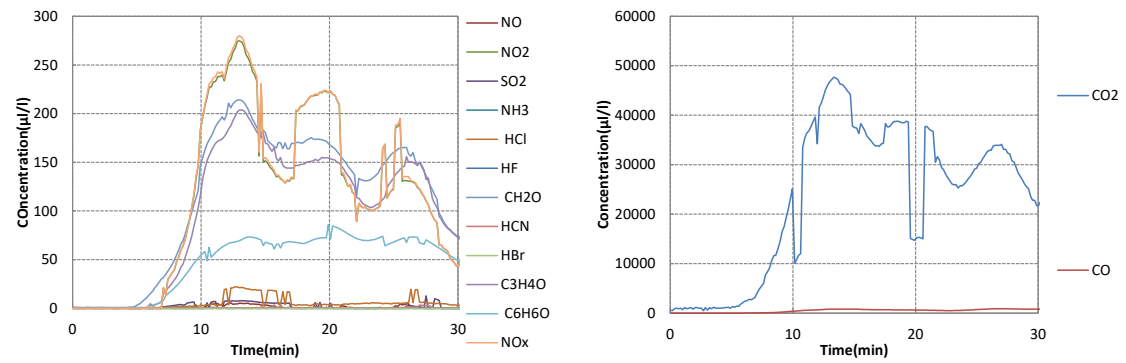
4.1.2.2 木材（スギ;無処理）

木材の主な成分はセルロースセルロース、ヘミセルロース、リグニンであり、炭素、水素、酸素以外には微量に窒素、リン、イオウ、マグネシウム、鉄、カルシウム、カリウムなどが含まれている。木材は住宅に広く使用されており、内装や家具の他、木造住宅では構造部材としても使われている。

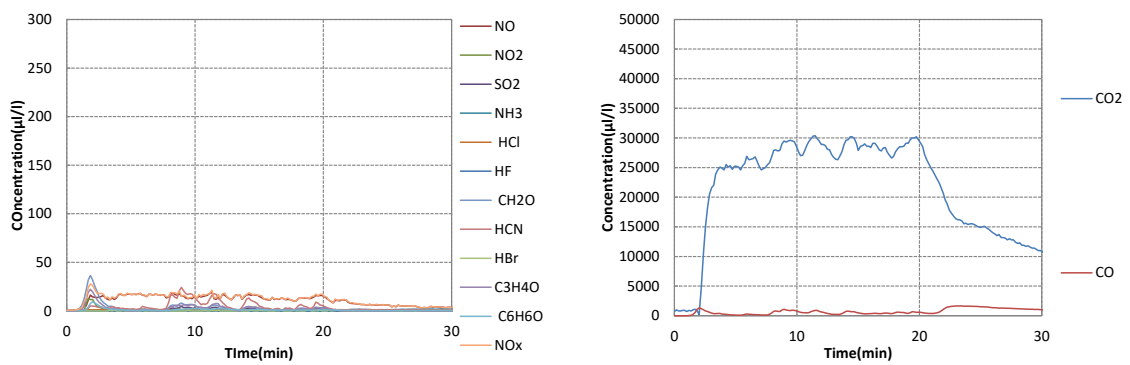
図 4.2.3 に木材のガス成分分析結果を示す。stage2a では有害性ガスがほとんど生成しなかった。stage1b では刺激性ガスの窒素酸化物およびホルムアルデヒド、アクロレインなどの有機系の有害性ガスが生成した。stage3 では、同じように有機系および窒素酸化物が生成したほか、窒息性ガスの HCN や CO も多く生成した。また、3a と 3b を比較すると、燃焼温度の低い 3a の方が刺激性ガスの濃度がより高く、窒息性ガスの濃度が低い結果となった。

従って、木材は低温時において、刺激性影響が大きく、高温でかつ酸素欠乏時は窒息性影響が大きい。

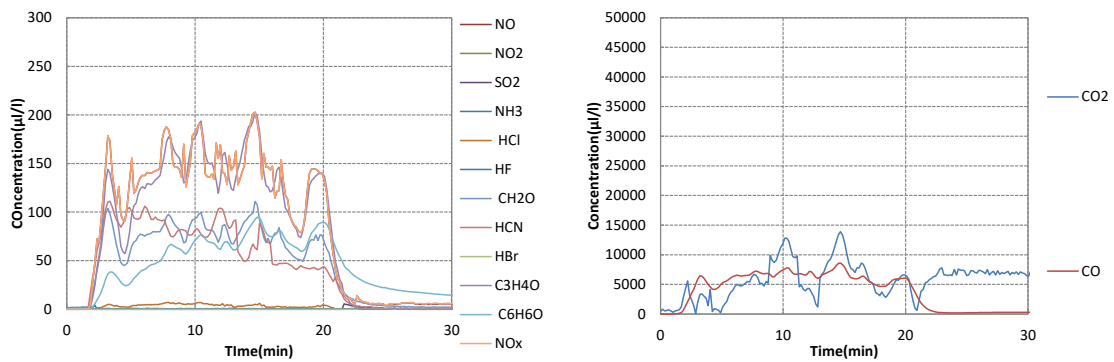
図 4.2.4 に主要生成ガスの種類ごとのガス成分分析結果を示す。木材においては、種類多くのガスが生成した。CO や HCN は stage3 で多く生成、 C_6H_6O や C_3H_4O は stage1b,3a で多く生成した CO_2 や NO_2 は stage1b で多く生成し、stage2a においても CO_2 が生成した。



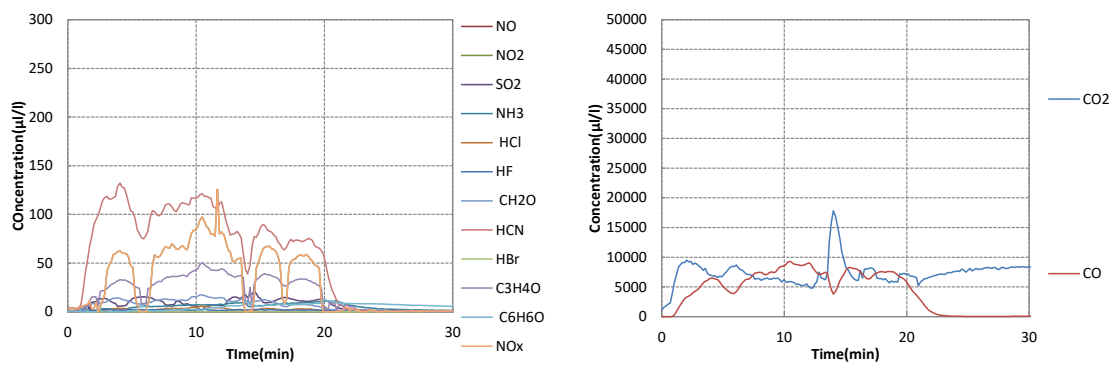
(a) stage1b



(b) stage2a



(c) stage3a



(d) stage3b

図 4.2.3 木材のガス成分分析結果

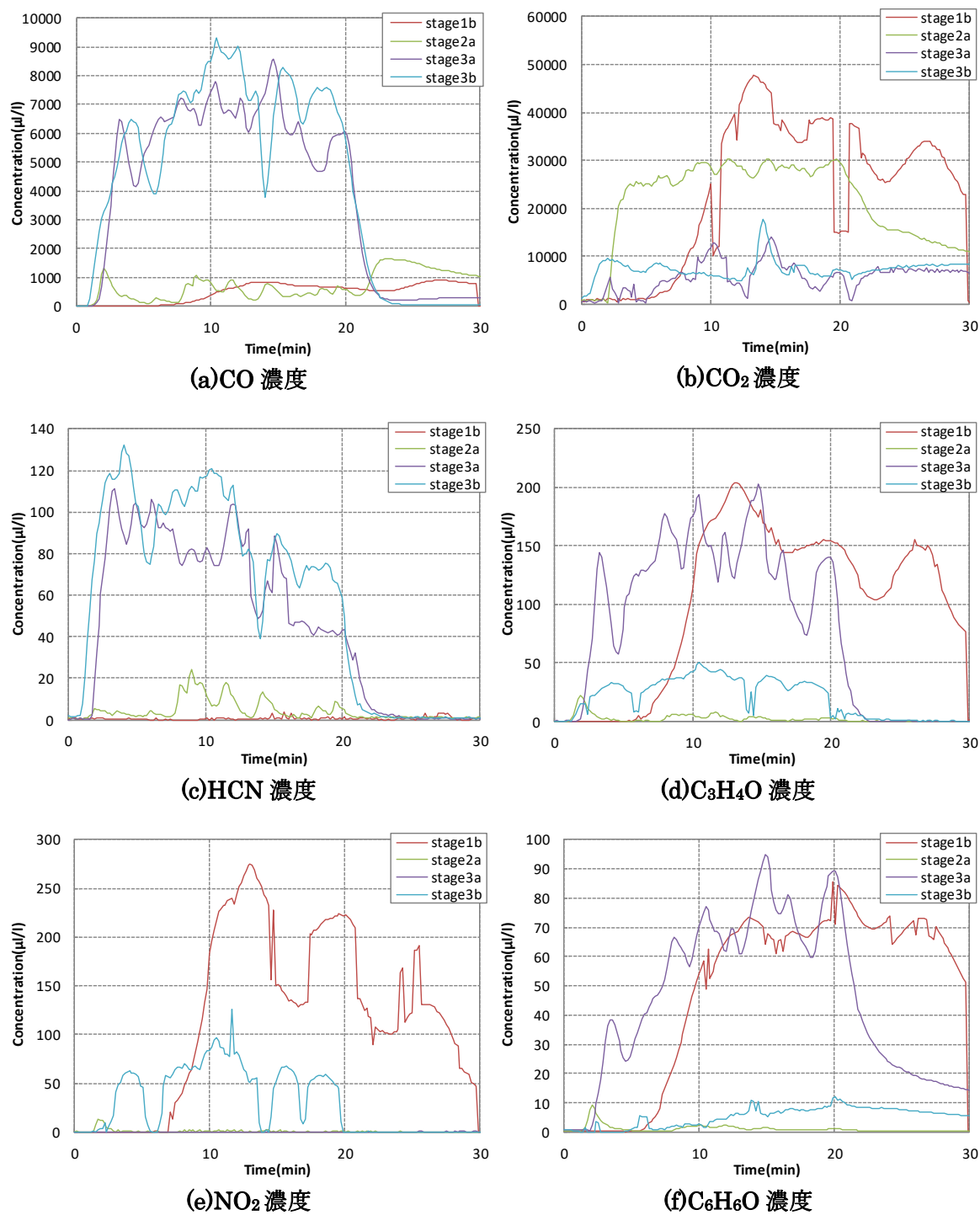
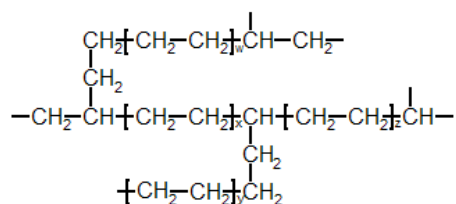


図 4.2.4 木材の有害性ガスの種類ごとの結果

4.1.2.3 低密度ポリエチレン(LDPE)



低密度ポリエチレンはエチレンがランダムに分岐を持って結合した合成樹脂である。主な用途としては包装用フィルムや電線、建築資材などが挙げられる。低密度ポリエチレン(LDPE)のガス成分分析結果を図4.2.5に示す。

stage1b のくん焼段階では刺激性ガスのホルムアルデヒドやアクロレインのみが生成した。stage2a では刺激性ガスの HCN が生成した。stage3 については、3a では窒素酸化物が多く生成したほか、HCN およびホルムアルデヒドが生成したが、3b では窒素酸化物と少ない HCN が生成し、濃度は stage3a の方が高い結果となった。

従って、LDPE はくん焼段階では刺激性影響が大きく、燃焼支配型の有炎燃焼以降の火災段階では窒息性影響が強くなり、酸素支配型条件下では刺激性および窒息性がともに大きな影響を及ぼす。

図4.2.4に主要生成ガスの種類ごとのガス成分分析結果を示す。低密度ポリエチレンにおいては、HCN, NO₂, C₃H₄O が生成した。CO は stage2a で一番多く生成し、他のガスは stage3a で一番多く生成した。Stage1b では、C₃H₄O は加熱終了後も生成した

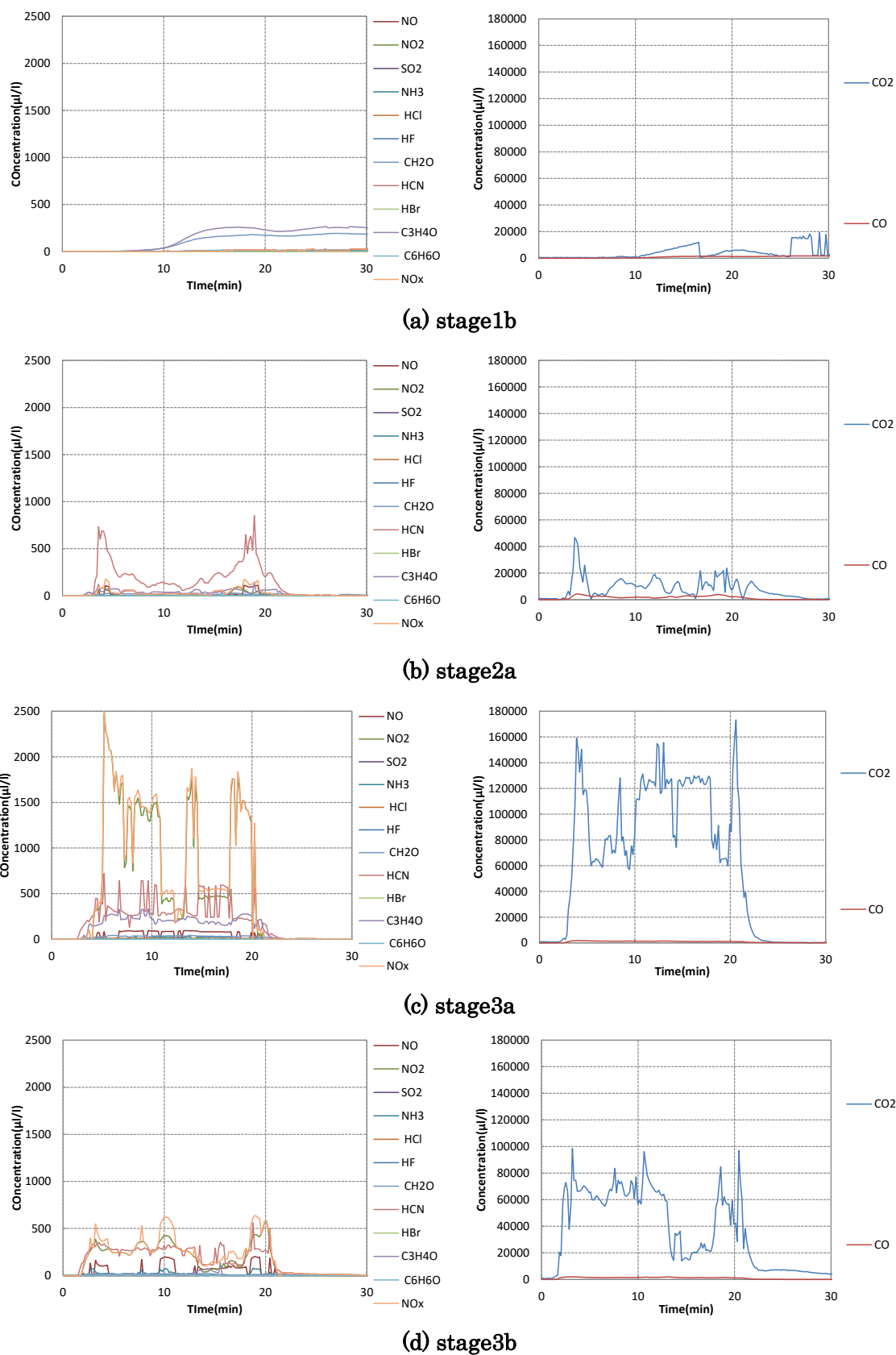


図 4.2.5 低密度ポリエチレンのガス成分分析結果

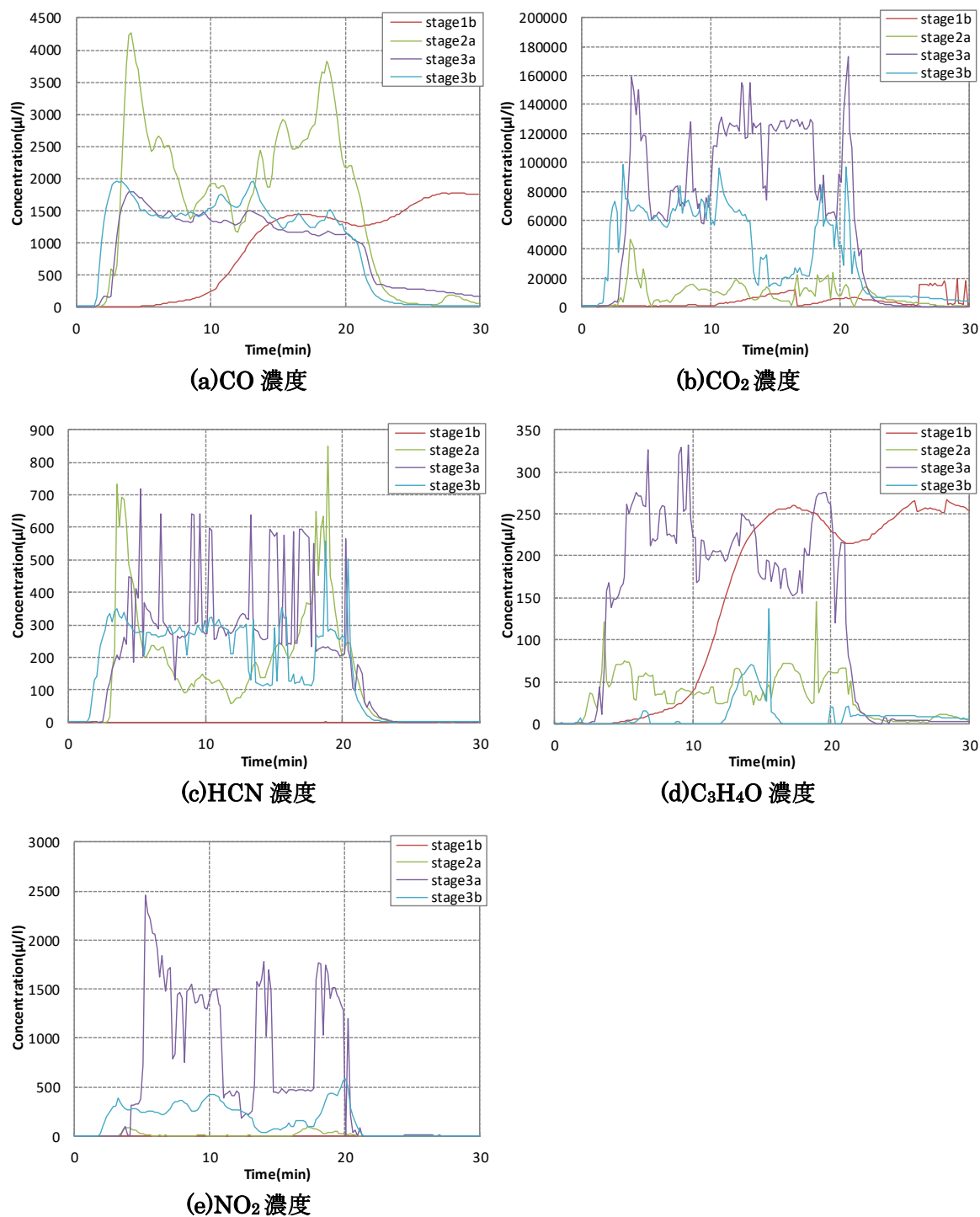
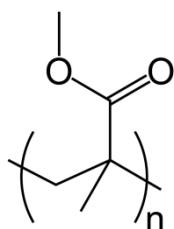


図 4.2.6 低密度ポリエチレンの有害性ガスの種類ごとの結果

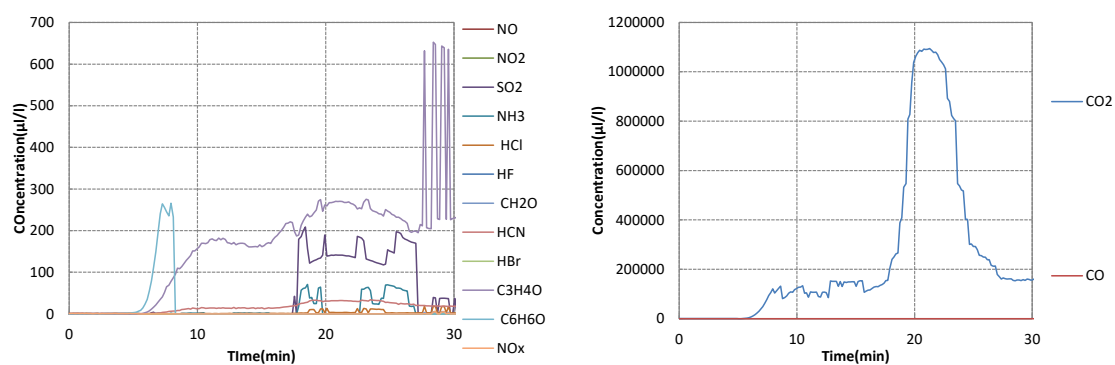
4.1.2.4 アクリル樹脂(PMMA)



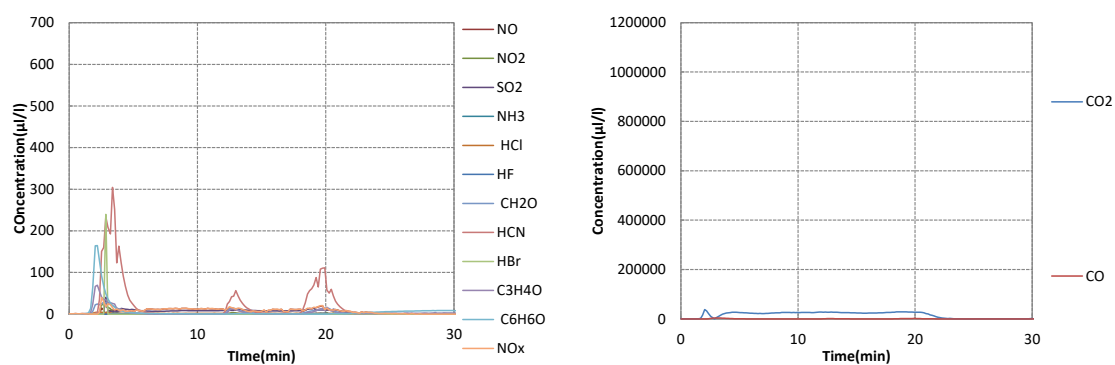
アクリル樹脂はアクリル酸エステルの重合体からなる合成樹脂である。主な用途としては、建築用塗料、接着剤などが挙げられる。

アクリル樹脂(PMMA)のガス成分分析結果を図4.2.7に示す。stage1bでは刺激性ガスのホルムアルデヒドが多く生成し、 SO_2 も生成した。また、熱分解が始まったのは加熱開始から4分後であった。stage2aではHCNが生成したが、他の有害性ガスはほとんど生成しなかった。stage3aでは、刺激性ガスについてはホルムアルデヒドおよびアクロレイン、窒息性ガスのHCNが多く生成した。stage3bは3aと比較し、HCNおよびCOの濃度が上がり、刺激性ガスおよび CO_2 の濃度が下がった。従って、アクリル樹脂は加熱温度が高いほど、窒息性影響が大きい。

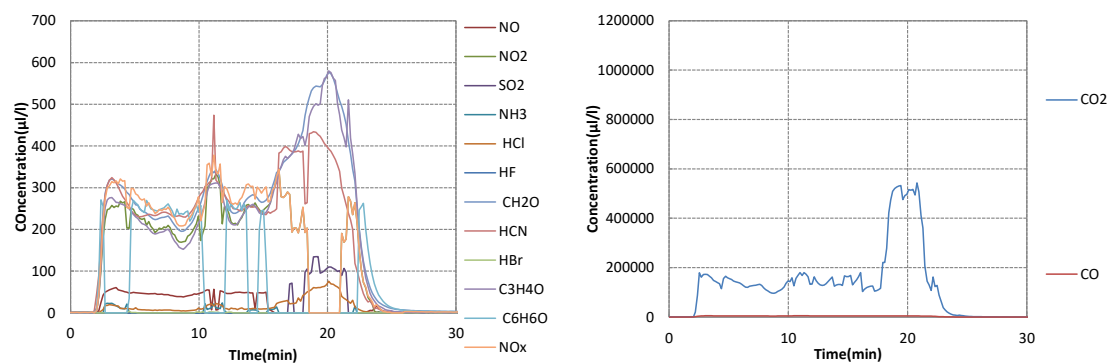
図4.2.8に主要生成ガスの種類ごとのガス成分分析結果を示す。アクリル樹脂においては、種類多くのガスが生成した。COやHCNや NO_2 はstage3で多く生成、 $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$ や $\text{C}_3\text{H}_4\text{O}$ はstage1b,3aで多く生成した。 CO_2 はstage1bで多く生成した。



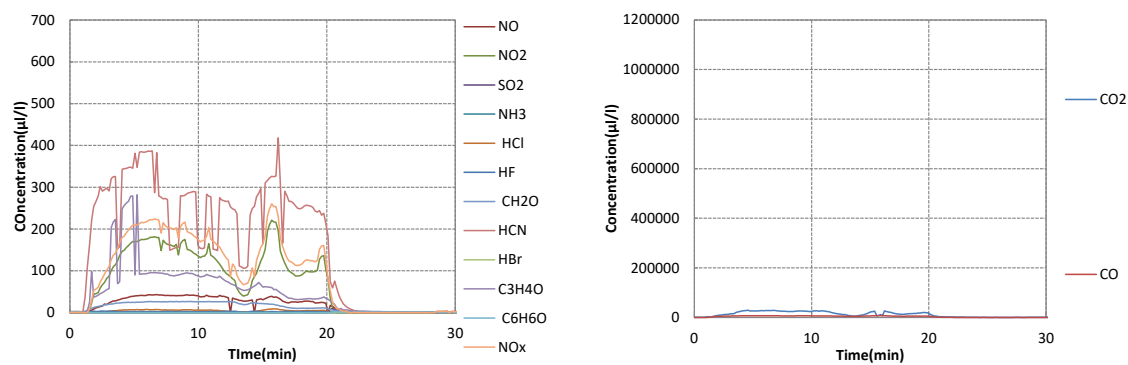
(a) stage1b



(b) stage2a



(c) stage3a



(d) stage3b

図 4.2.7 アクリル樹脂のガス成分分析結果

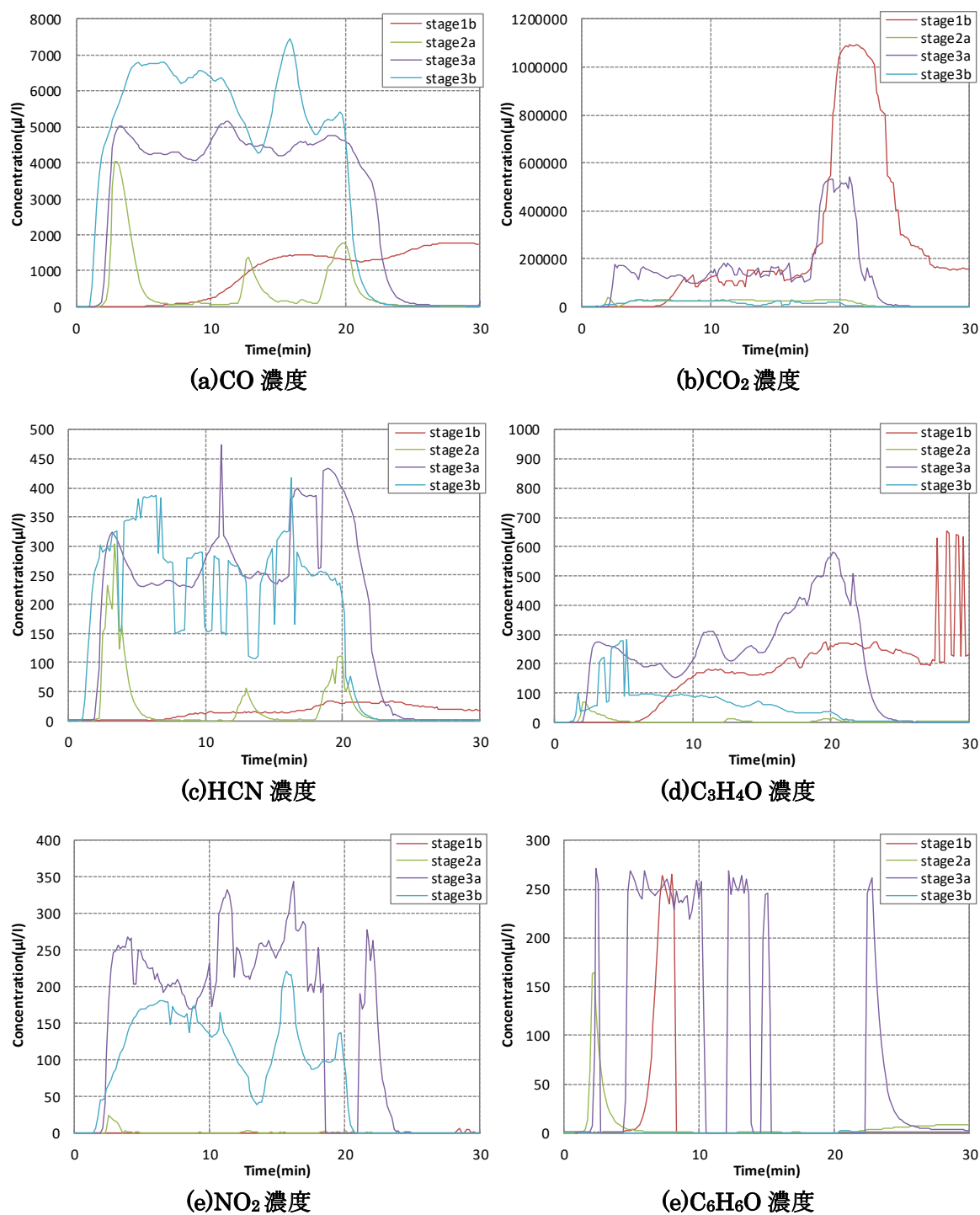
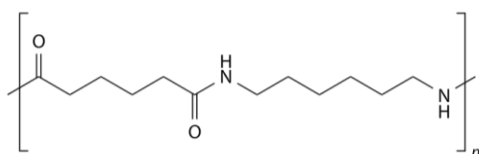


図 4.2.8 アクリル樹脂の有害性ガスの種類ごとの結果

4.1.2.5 ナイロン 6,6

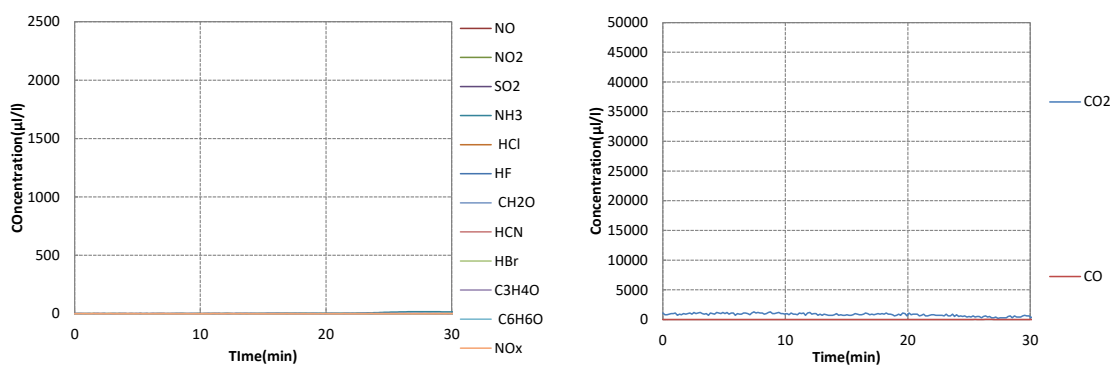


ナイロン 6,6 はポリアミドの合成繊維である。

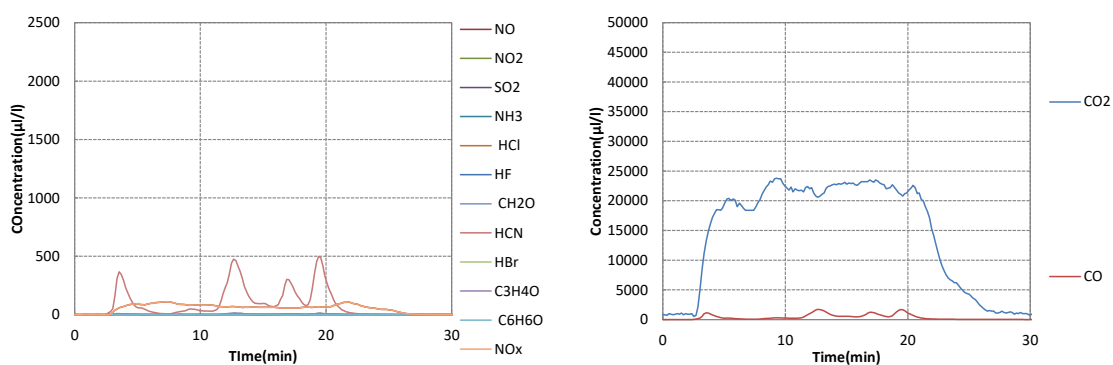
図 4.2.9 にガス成分の分析結果を示す。ナイロン 6,6 において、stage1b では CO_2 以外のガスはほとんど生成しなかった。stage2a では、窒息性ガスの HCN と CO が生成した。火災段階が進展するにつれ、窒息性ガスの濃度が上がり、stage3b では極めて高い HCN および CO が生成した。

従って、ナイロン 6, 6 は火災の初期段階ではそれほど有害性ガスを生成することはないが、酸素欠乏状況下において、濃度の高い窒息性ガスを生成する。

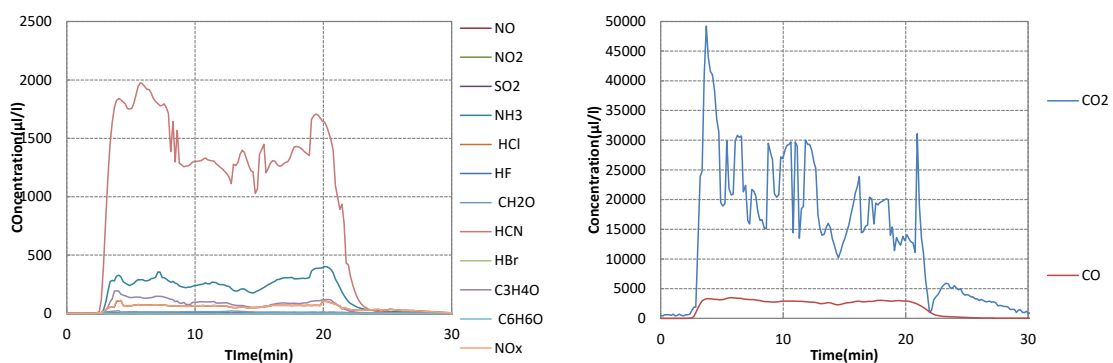
図 4.2.10 に主要生成ガスの種類ごとのガス成分分析結果を示す。ナイロン 6,6 において、HCN, $\text{C}_3\text{H}_4\text{O}$ が生成した。CO は stage3a,3b で多く生成し、 CO_2 や $\text{C}_3\text{H}_4\text{O}$ は stage3a で一番多く生成し、HCN 濃度は stage3b で多く生成した。



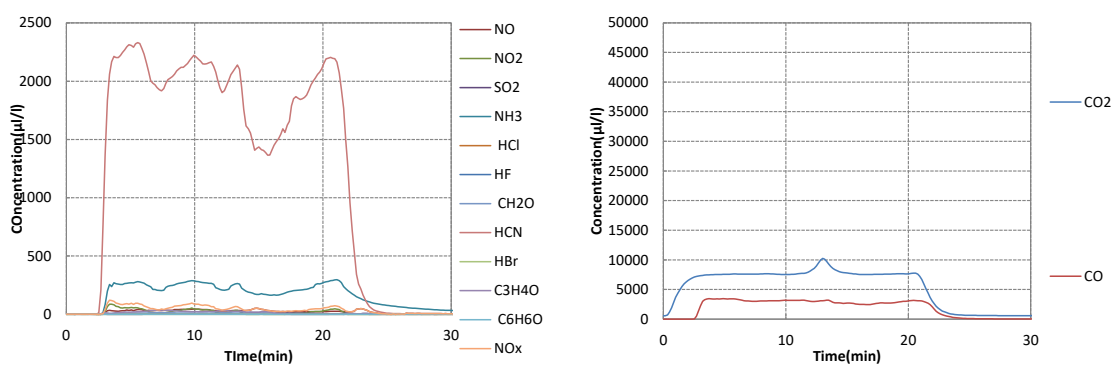
(a) stage1b



(b) stage2a



(c) stage3a



(d) stage3b

図 4.2.9 ナイロン 6,6 のガス成分分析結果

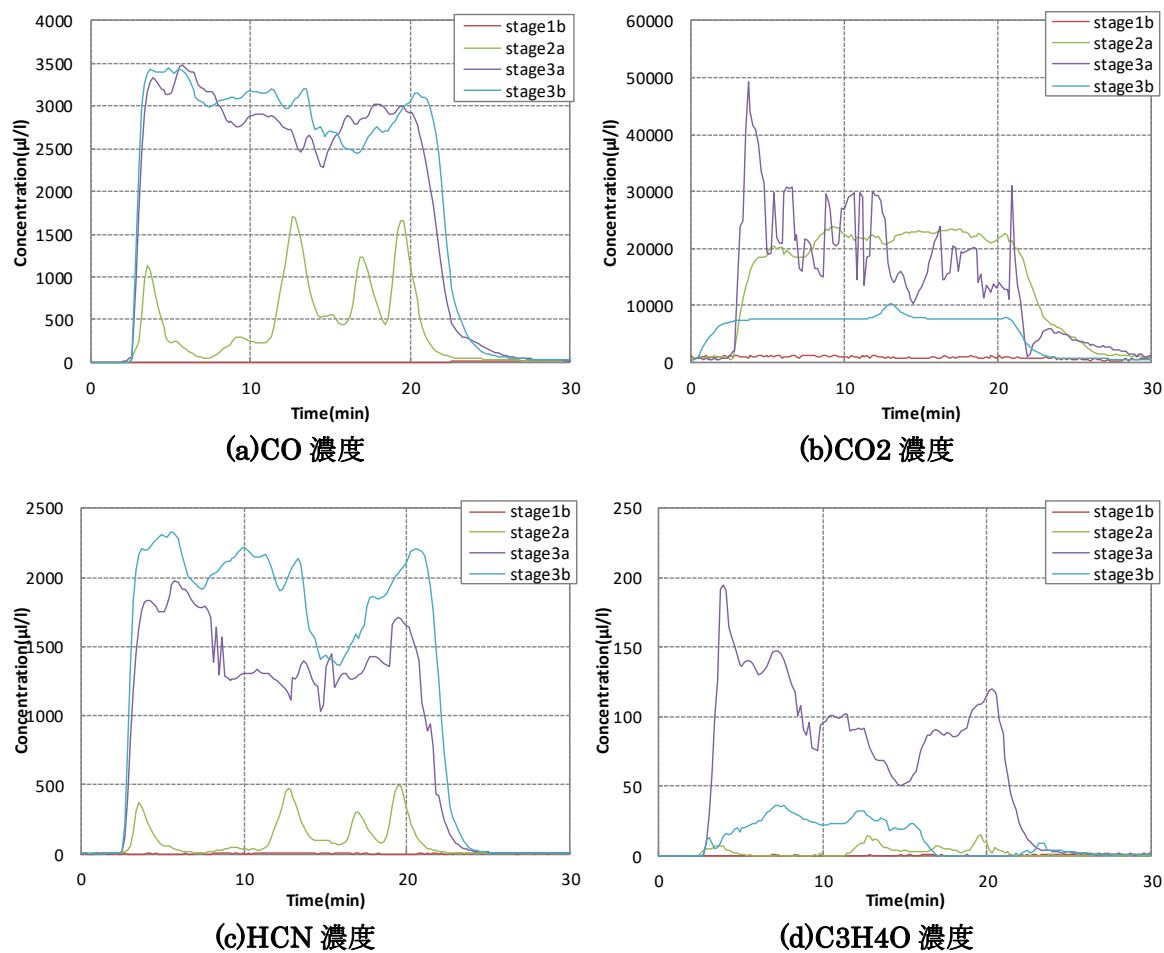


図 4.2.10 ナイロン 6,6 の有害性ガスの種類ごとの結果

4.1.2.6 試験体ごとの各種ガスと燃焼生成ガスの関係

試験体塩化ビニル、木材、低密度ポリエチレン、アクリル樹脂、ナイロン 6,6 を火災進展段階に応じて加熱実験を行い、それぞれの試験体において各種ガスが多く生成する加熱条件を得た。各種ガスが最も多く生成した火災進展段階を表 4.2.1 に示す。

表 4.2.1 各種ガスと燃焼条件の関係

	CO	CO ₂	HCN	C ₃ H ₄ O	NO ₂	C ₆ H ₆ O	HCl
LDPE	2a	3a	3a	3a	3a	-	-
木材	3	1b,2a	3	1b,3a	1b	1b,3a	-
PVC	2a	1b	-	1b	-	1b	1b
PMMA	3	1b	3	1b,3a	3	1b,3a	-
ナイロン6,6	3	3a	3b	3a	-	-	-

表 4.2.1 から材料の加熱生成ガスの特徴を整理した。

塩化ビニルはくん焼期に多くの刺激性ガスが熱分解で生成し、窒息性ガスの生成はそれほど多くない。

木材やアクリル樹脂から生成する有害性ガスは種類が多く、くん焼期に多くの刺激性ガスが生成する。窒息性ガスは酸素欠乏した状況で多く生成する。

低密度ポリエチレンは酸素欠乏状況下で多くの有害性ガスを生成するため、フラッシュオーバー直前およびフラッシュオーバー後が危険である。

ナイロン 6,6 は火災初期段階ではあまりガスが生成せず、温度が上昇したフラッシュオーバー前後に多くの有害性ガスを生成する。

4.1.3 毒性評価

典型的な火災において、CO と HCN のみが許容避難時間に重要な影響を及ぼす窒息性燃焼生成ガスであるとされている。本研究の目的である避難時における有害性ガスの影響を調べるために、窒息性ガスが避難者に与える影響を評価した毒性モデル ISO13571 の窒息性モデルを用いて各火災進展段階の毒性値 X_{FED} を計算した。また、必要避難時間に与える影響を評価するために、歩行速度に影響を与えるとされている刺激性ガスの影響を同規格の刺激性モデルを用いて毒性値 X_{FEC} を計算した。 X_{FED} および X_{FEC} はそれぞれ、窒息性有毒ガスおよび刺激物質の暴露量に対する、平均的な感度を持つものが暴露された場合に、ある特定の影響を作用すると考えられる暴露量との比であり、閾値は平均的な感受性の在館者が避難できなくなる目安値として 1.0 と定められている。

毒性値のグラフから、材料によって最も有害性ガスの影響が大きい火災進展段階は材料によって異なる結果となった。

刺激的影響については、PVC、WOOD、HDPE は stage1b が最大となり、PMMA、NYLON6,6 は stage3a が最大となった。

窒息的影響については、PVC、HDPE は stage2a が最大となり、WOOD、PMMA、NYLON6,6 は stage3b が最大となった。

4.1.3.1 ポリ塩化ビニル(PVC)

ポリ塩化ビニルの毒性値は火災進展段階が進むにつれ、小さくなった。Stage1b では X_{FED} や L_{FED} が大きく、これは HCl が多く生成したためである。しかし、温度が上昇にともない、生成量が減少し、毒性値が減少した。

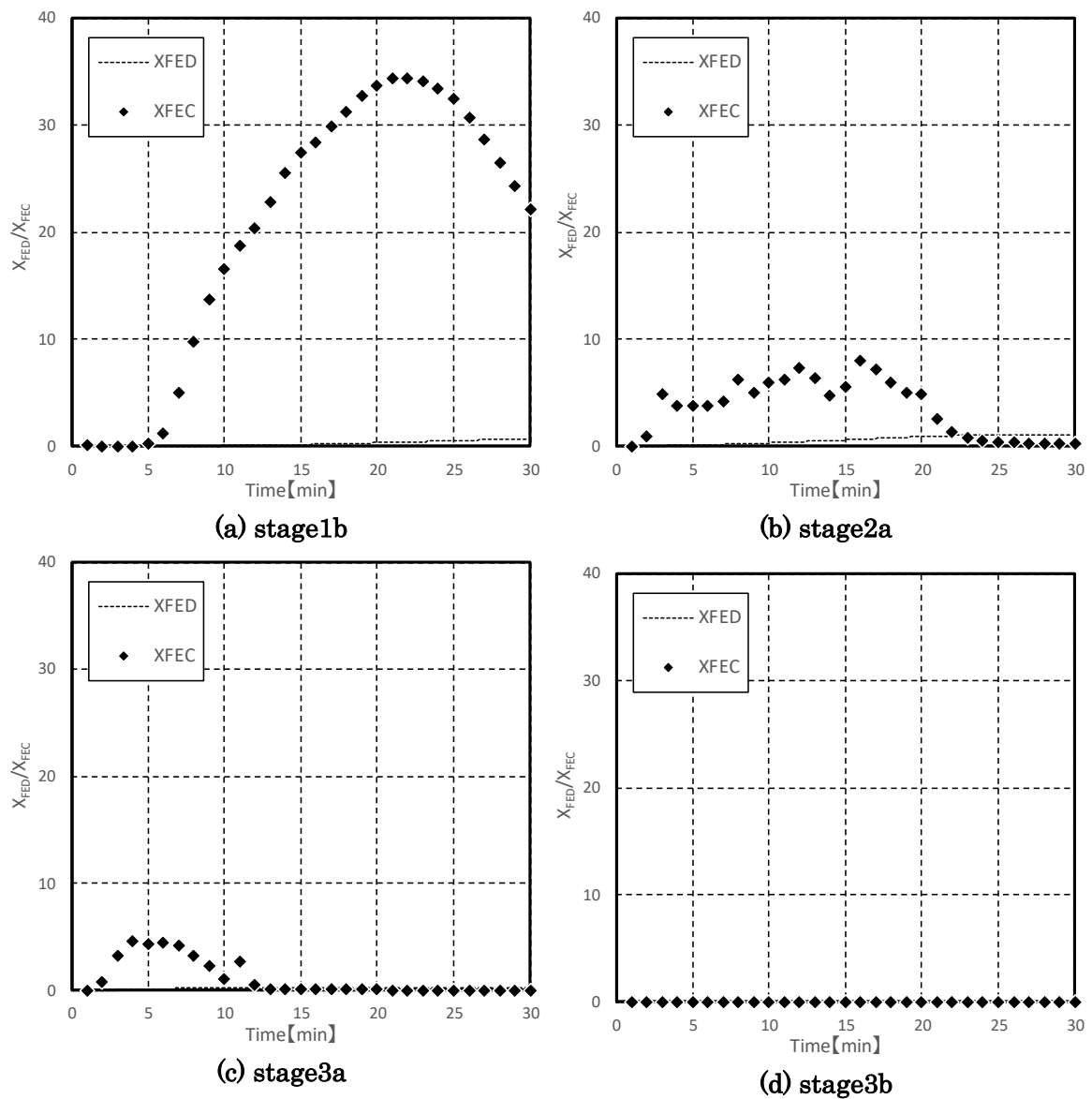


図 4.3.1 ポリ塩化ビニルの毒性値の計算結果

4.1.3.2 木材

30 分間の毒性値最大値については、 X_{FEC} は stage1b において一番高い値となった。 X_{FED} は stage3b において一番高く、 L_{FED} は stage3a において一番高い値となった。Stage2a では毒性値が小さかった。

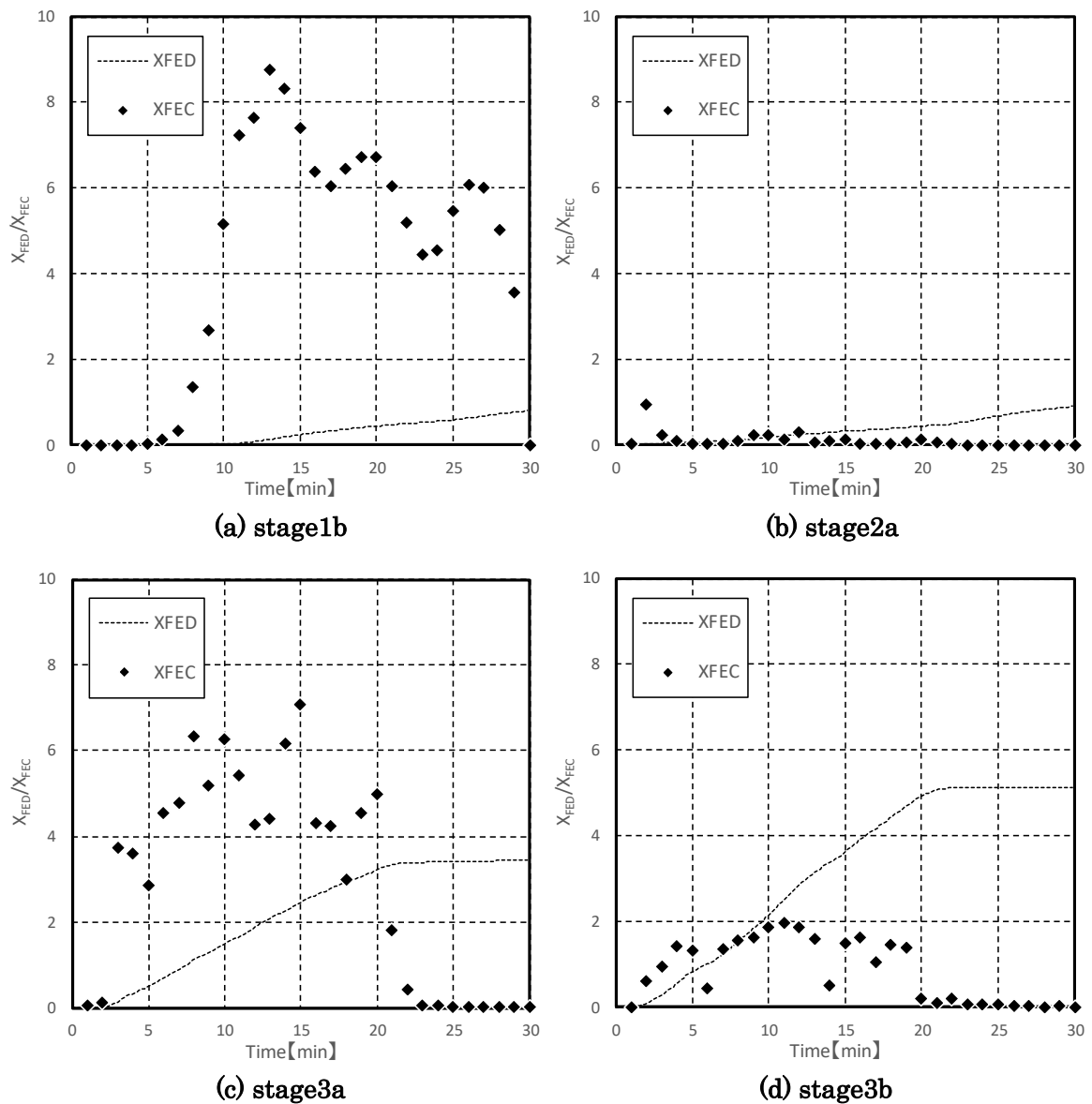


図 4.3.2 木材の毒性値の計算結果

4.1.3.3 低密度ポリエチレン(LDPE)

30 分間の毒性値最大値については、 X_{FEC} は stage1b において一番高い値となった。 X_{FED} は stage3b において一番高く、 L_{FED} は stage3a において一番高い値となった。stage1b 以外の火災進展段階では 5 分より前に、 L_{FED} や X_{FEC} が閾値を超えた。

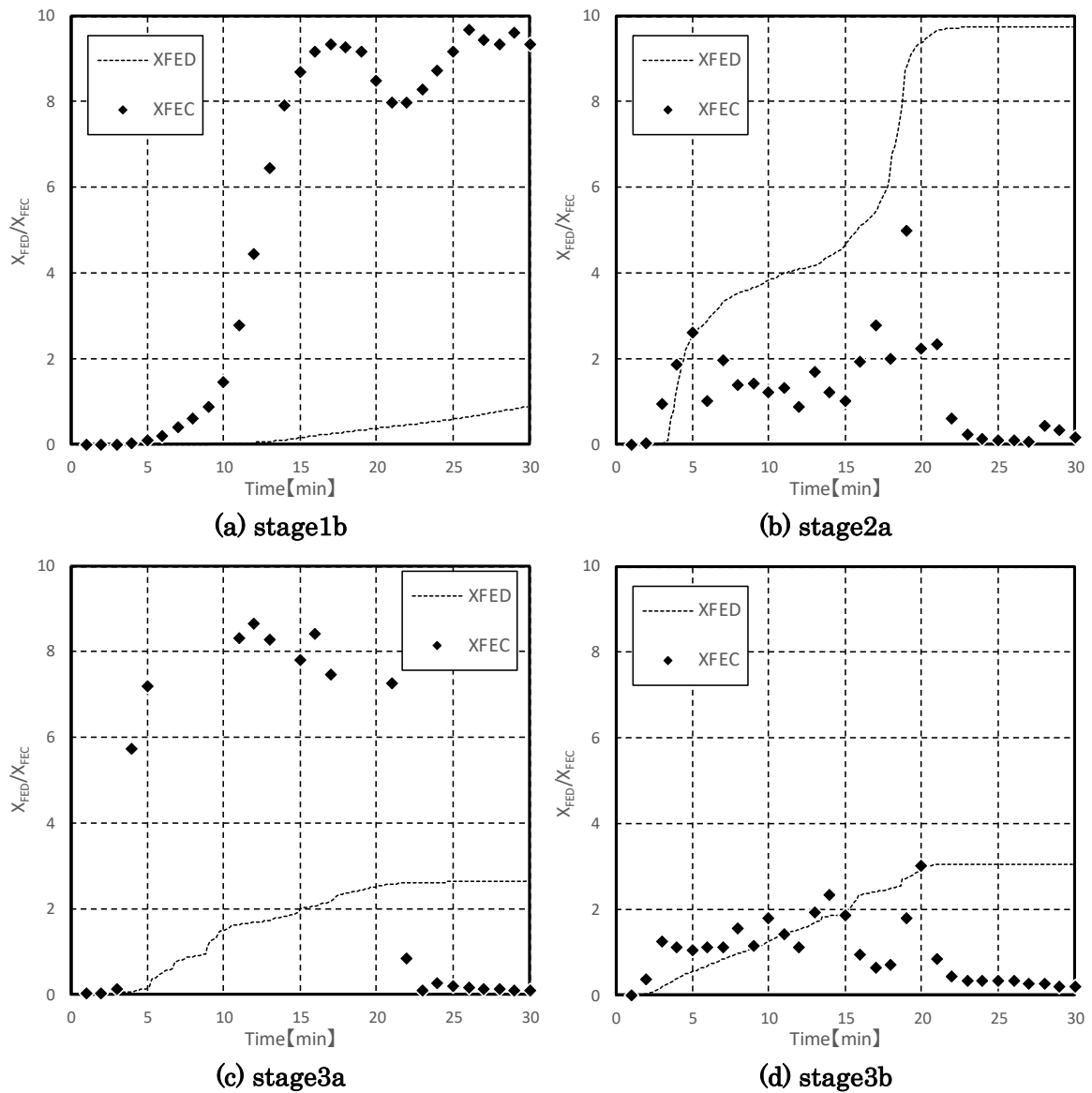


図 4.3.3 低密度ポリエチレン毒性値の計算結果

4.1.3.4 アクリル樹脂(PMMA)

30 分間の毒性値最大値については、 X_{FEC} 、 X_{FED} は stage3a において一番高い値となった。 L_{FED} は stage3b において一番高い値となった。stage2a では、他の火災進展段階と比べ、毒性値が小さい結果となった。

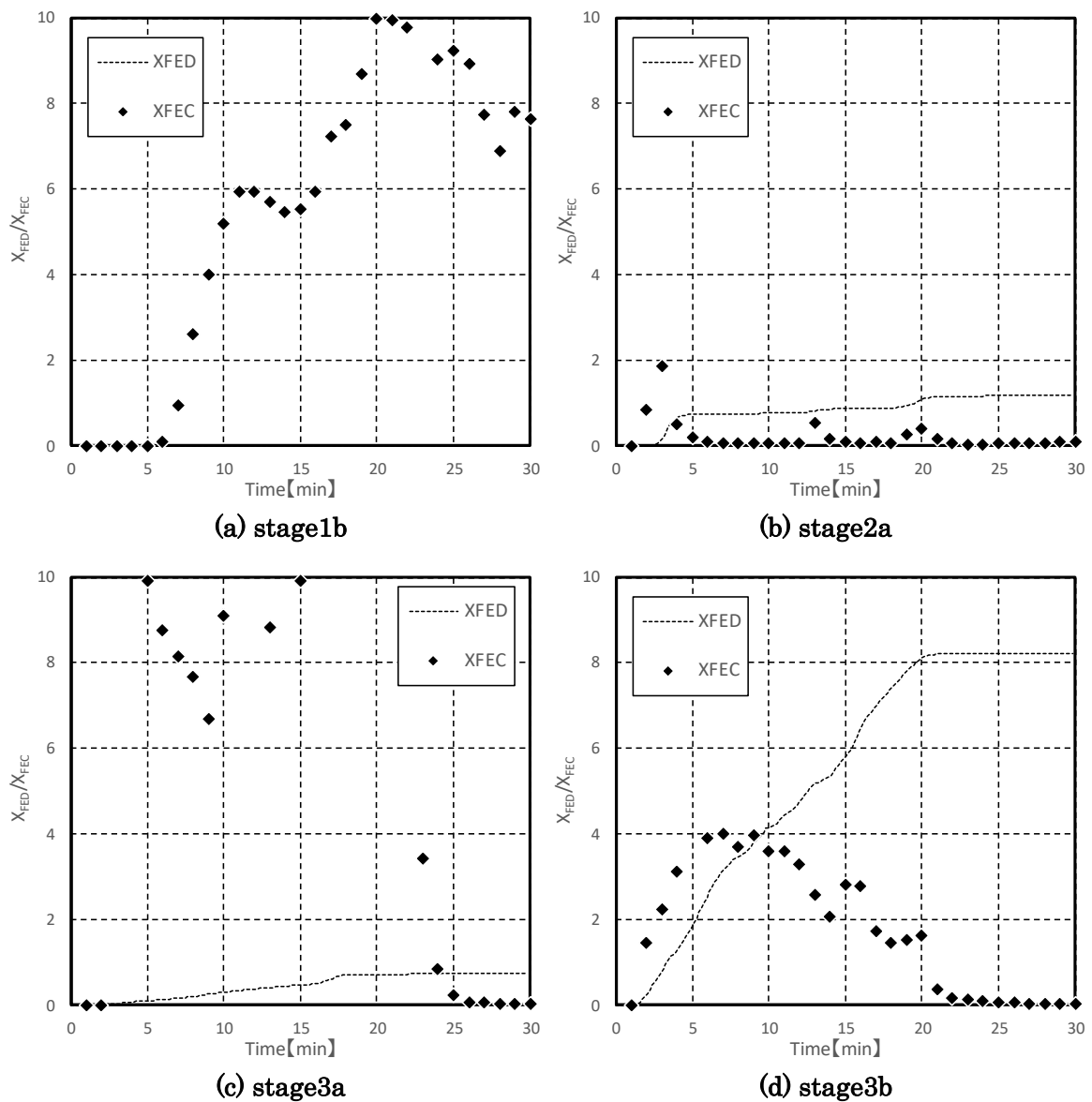


図 4.3.4 アクリル樹脂の毒性値の計算結果

4.1.3.5 ナイロン 6,6(NYLON6,6)

stage1b は毒性値がほぼ 0 であった。30 分間の毒性値最大値については、 X_{FEC} 、 X_{FED} は stage3a において一番高い値となった。 L_{FED} は stage3b において一番高い値となった。

どの火災進展段階においても、窒息的影響と比較すると、刺激的影響は大きくならなかった。

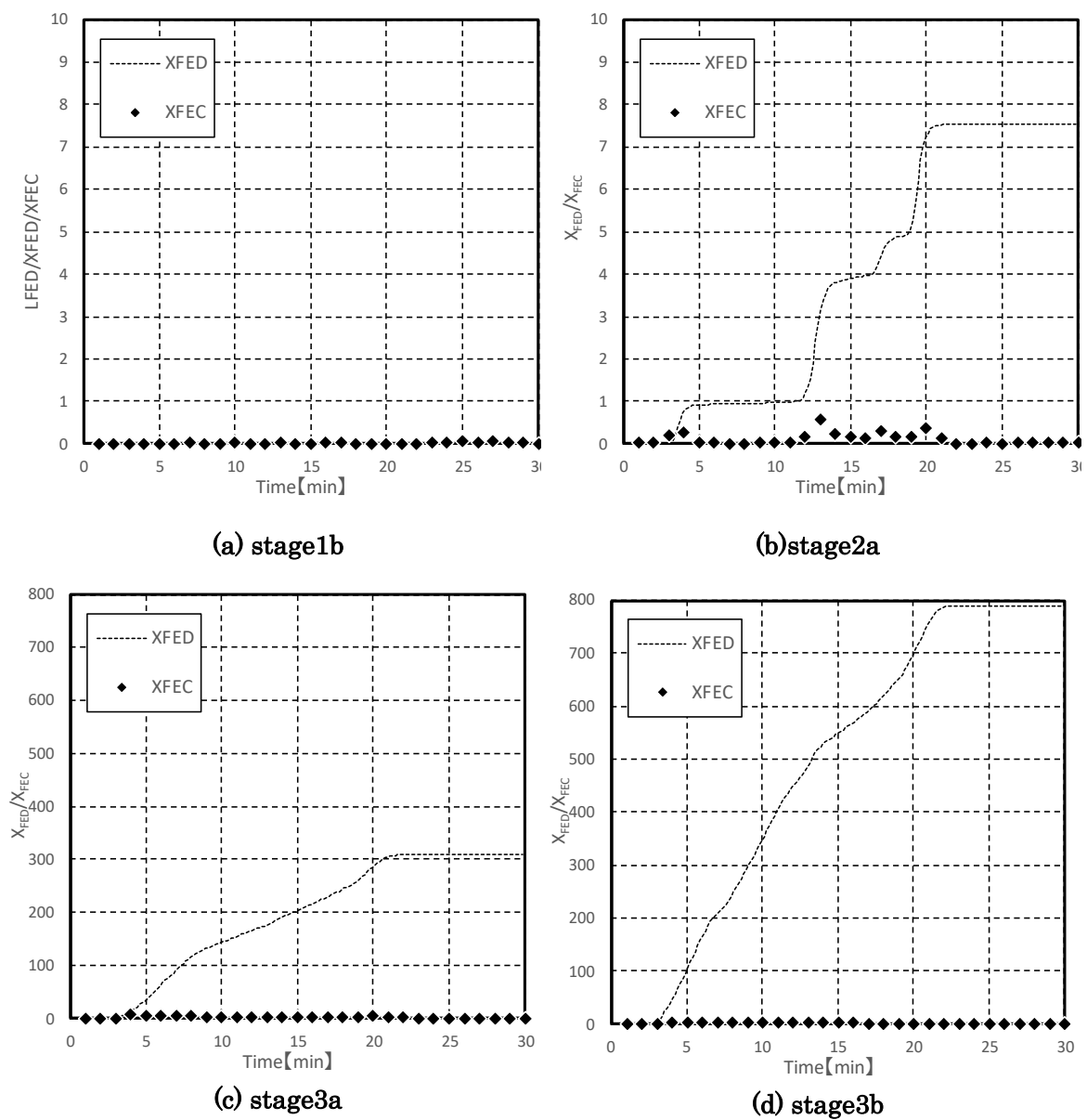
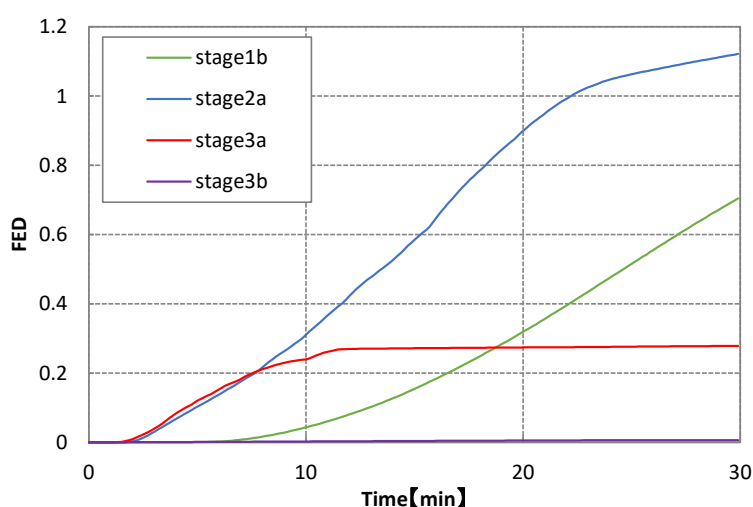
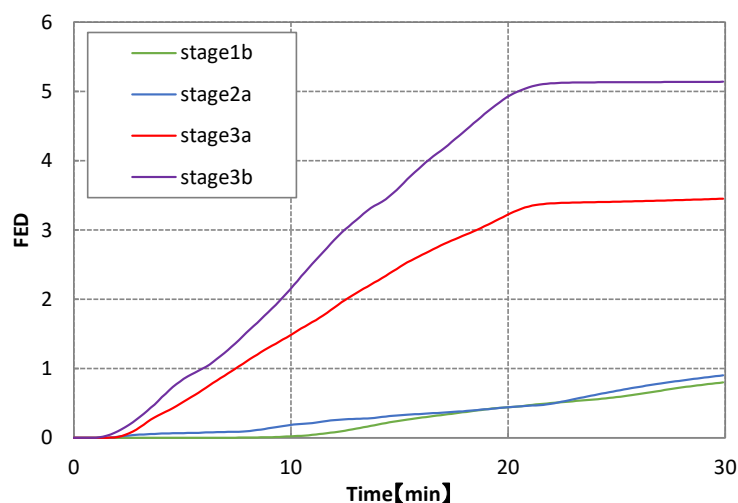


図 4.3.5 ナイロン 6,6 の毒性値の計算結果

4.1.4 燃焼条件と燃焼生成物の関係

4.4 節より、チューブ炉試験の実験結果から計算した X_{FED} の値は加熱開始からしばらく時間が経過すると、安定した状態になり、増加量が一定になることがわかる。4.3 節の結果について、試験体別に整理したものを図 4.4.1 に示す。

X_{FED} の結果を図 4.4.1～5 に示す。さらに、時間が経過すると、くん焼以外の火災進展段階では試験体がすべて燃焼し、窒息性ガスの生成がなくなったため、 X_{FED} が一定の値に収束した。燃焼が安定状態である時、 X_{FED} の値は線形になることから、 X_{FED} の増加割合 $\Delta X_{FED}/\Delta t$ を計算し、表 4.4.1 に示す。

図 4.4.1 PVC の X_{FED} 値図 4.4.2 WOOD の X_{FED} 値

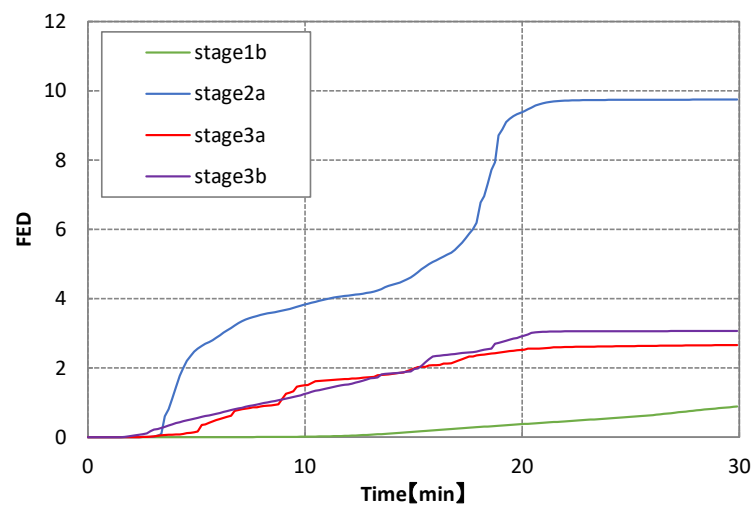


図 4.4.3 LDPE の X_{FED} 値

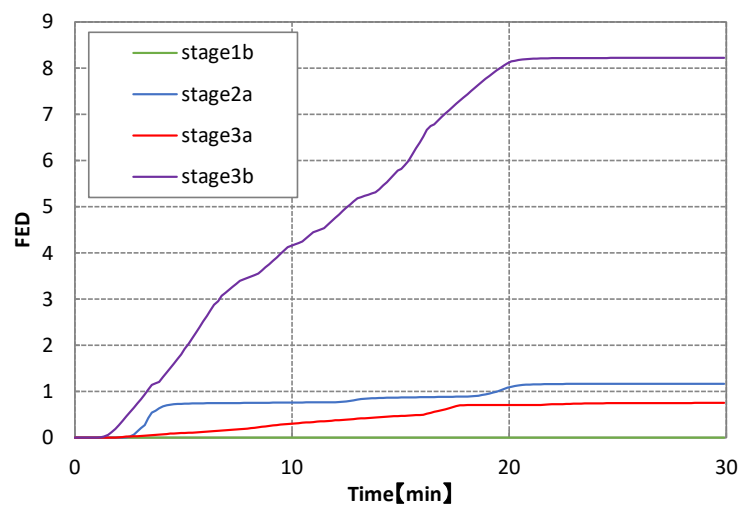


図 4.4.4 PMMA の X_{FED} 値

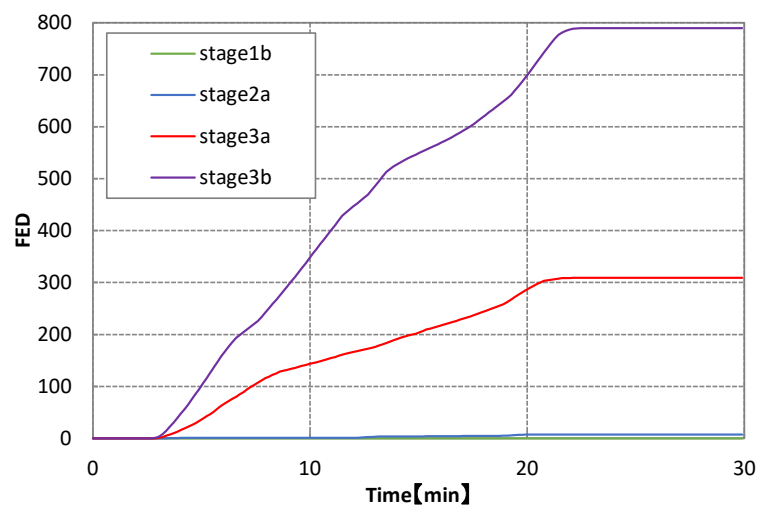


図 4.4.5 NYLON6,6 の X_{FED} 値

表 4.4.1 X_{FED} の増加割合 $\Delta X_{FED}/\Delta t$

	stage1b	stage2a	stage3a	stage3b
PVC	0.03	0.06	0.04	0.00
WOOD	0.04	0.03	0.17	0.28
LDPE	0.04	0.49	0.10	0.17
PMMA	0.00	0.01	0.04	0.33
NYLON6,6	0.00	0.41	14.30	48.05

試験体が燃焼する場合に発生する有害性ガスの窒息性影響は、試験体の加熱条件を火災進展段階ごとに分割し、それぞれの段階において燃焼条件がおおよそ一定と見なすと、表 4 に示す FED の増加割合から実火災の FED 値の予測が可能と考えられる ΔX_{FED} の予測式を式 4.4.1 に示す。

$$X_{FED} = \sum \Delta X_{FED} / \Delta t \times t \dots \text{式 4.4.1}$$

t : 火災進展段階ごとの時間

$\Delta X_{FED} / \Delta t$: 火災進展段階ごとの変化割合、安定した燃焼状態下における単位時間分の X_{FED} 増加量

式 4.4.1 を使い、ガス有害性試験の実験結果の予測を行った。ガス有害性試験装置では、始めにガスバーナーで 3 分間加熱した後、さらに 1.5kW の電気ヒーターで 3 分間加熱を加え、合計 6 分間加熱した。これにより、0~3 分は有炎燃焼（燃料支配）段階、3~6 分は酸素欠乏状況下の区画火災段階、6~15 分については温度が徐々に下がっているため火災進展段階の減衰段階に近いと考えられる。ガス有害性試験では試験開始から 6 分以降二次空気の供給がないことを考えると、6~15 分の内、温度が高い状態では F.O.後の盛期火災段階、温度が下がった状態ではくん焼段階に近いと想定する。木材のガス有害性試験についての X_{FED} 値を式(1)から計算し、実際のガス成分分析濃度から計算した値と比較した結果を図 4.4.6 に示す。ここでは、F.O.後の盛期火災段階とくん焼期段階の境目を排気温度 150℃になった時の時間である 10 分とした。

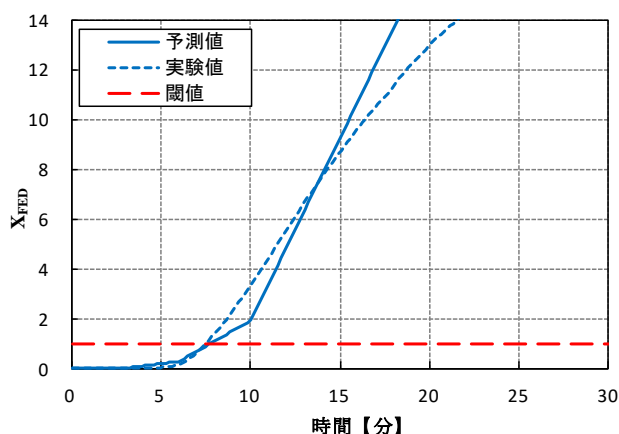
図 4.4.6 木材の FED の実験値と予測値の比較

図 4.4.6 から、15 分間までは予測値と実験値が概ね一致し、閾値 1.0 を超える時間はほとんど差がなかった。従って、チューブ炉の実験結果から求めた $\Delta X_{FED} / \Delta t$ によって、

X_{FED} の値の予測は可能であり、その1の結果より、マウスの行動停止時間と FED が対応していることから、チューブ炉を用いることでマウスの行動停止時間を予測できることが示唆された。しかし、15 分以降の予測値と実験値は大きく異なり、これはくん焼段階と温度が低下した時の減衰期とでは燃焼条件が異なることが理由として考えられる。今後、減衰期を想定した加熱条件で実験を行い、より正確に予測値を求めることが可能と考えられる。

4.1.5 チューブ炉の加熱条件と燃焼温度

チューブ炉は一時空気を送りながら燃焼を行い、着火、発熱や延焼などの現象から燃焼温度は一定ではない。正確のチューブ炉内の燃焼温度を調べるために、数値シミュレーションを行った。数値シミュレーションについて、防火安全分野ではゾーンモデルとフィールドモデルの二つの手法が用いられている。CFD 解析はフィールドモデルである。ゾーンモデルについては、建築火災のような区画火災において、盛期火災時に見られる区画上部の高温層と下部の空気層の2種類に分けられる場合があり、期待の質量や熱的なバランスから記述した実用的数学的モデルがこれに当たる。火災安全性を評価する上で必要な情報を得ることは可能だが、複雑な形状や条件に対応することが困難である。一方 CFD 解析については、複雑な空間への適用や、より詳細な解析が可能である。本研究では、FDS を使って解析を行った。FDS はアメリカ NIST が開発している火災 CFD 計算コードであり、後処理として可視化ソフト Smoke View が付属している⁴⁾。

図 4.5.1 に熱解析のメカニズムを示す。試験体の燃焼速度から時間に対する燃焼区間を求め、燃焼区間の雰囲気温度を仮定し、試験体の発熱量やチューブ炉内の流速から移流による熱移動を求め、チューブ炉の出口温度値をシミュレーションで求める。熱解析のメカニズムを図 4.5.1 に示す。チューブ炉の解析を行うことにより、小規模な燃焼空間における着火、燃焼、延焼、生成ガスの拡散を再現することが可能である。

チューブ炉の出口の中央に熱電対を設定し、測定した出口温度の値と比較し、仮定した雰囲気温度の妥当性を検討する。

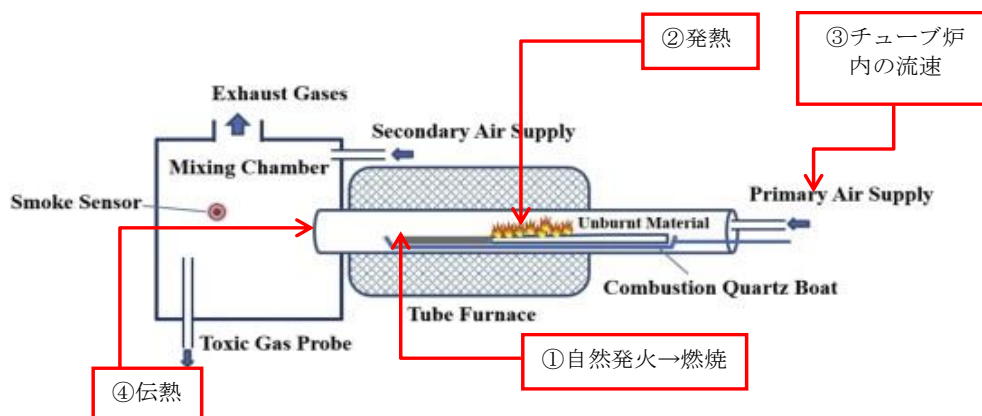


図 4.5.1 熱解析のメカニズム

4.5.1.1 FDS を使った解析モデル

FDS を使った解析モデルのコードを示し、stage2a の木材について解析した結果を図 4.5.2 ～図 4.5.7 に示す。

```
&HEAD CHID='untitled/' tube simulation with wood
&TIME T_END=500.0/
&DUMP      RENDER_FILE='untitled.ge1',      COLUMN_DUMP_LIMIT=.TRUE.,
DT_RESTART=400.0/

&MESH ID='Mesh', IJK=60,4,4, XB=0.0,0.6,0.0,0.04,0.0,0.04/

&MATL ID='YELLOW PINE',
    FYI='Quintiere, Fire Behavior - NIST NRC Validation',
    SPECIFIC_HEAT=2.85,
    CONDUCTIVITY=0.14,
    DENSITY=640.0/

&SURF ID='wood',
    RGB=146.0,202.0,166.0,
    BACKING='VOID',
    MATL_ID(1,1)='YELLOW PINE',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.01/
&SURF ID='heater',
    RGB=255.0,102.0,0.0,
    NET_HEAT_FLUX=120.0/
&SURF ID='air',
    RGB=26.0,204.0,26.0,
    VEL=-0.42/

&OBST ID='wood', XB=0.4,0.6,0.01,0.04,0.0,0.01, SURF_IDS='heater','wood','wood'/

&VENT ID='air', SURF_ID='air', XB=0.6,0.6,0.0,0.04,0.0,0.04/
&VENT ID='out', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.0,1.66544E-16,0.04,7.47666E-16,0.04/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.02/
&TAIL /
```

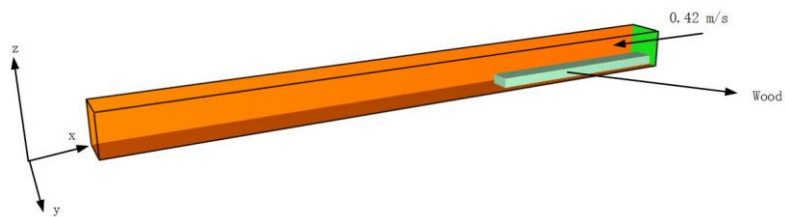
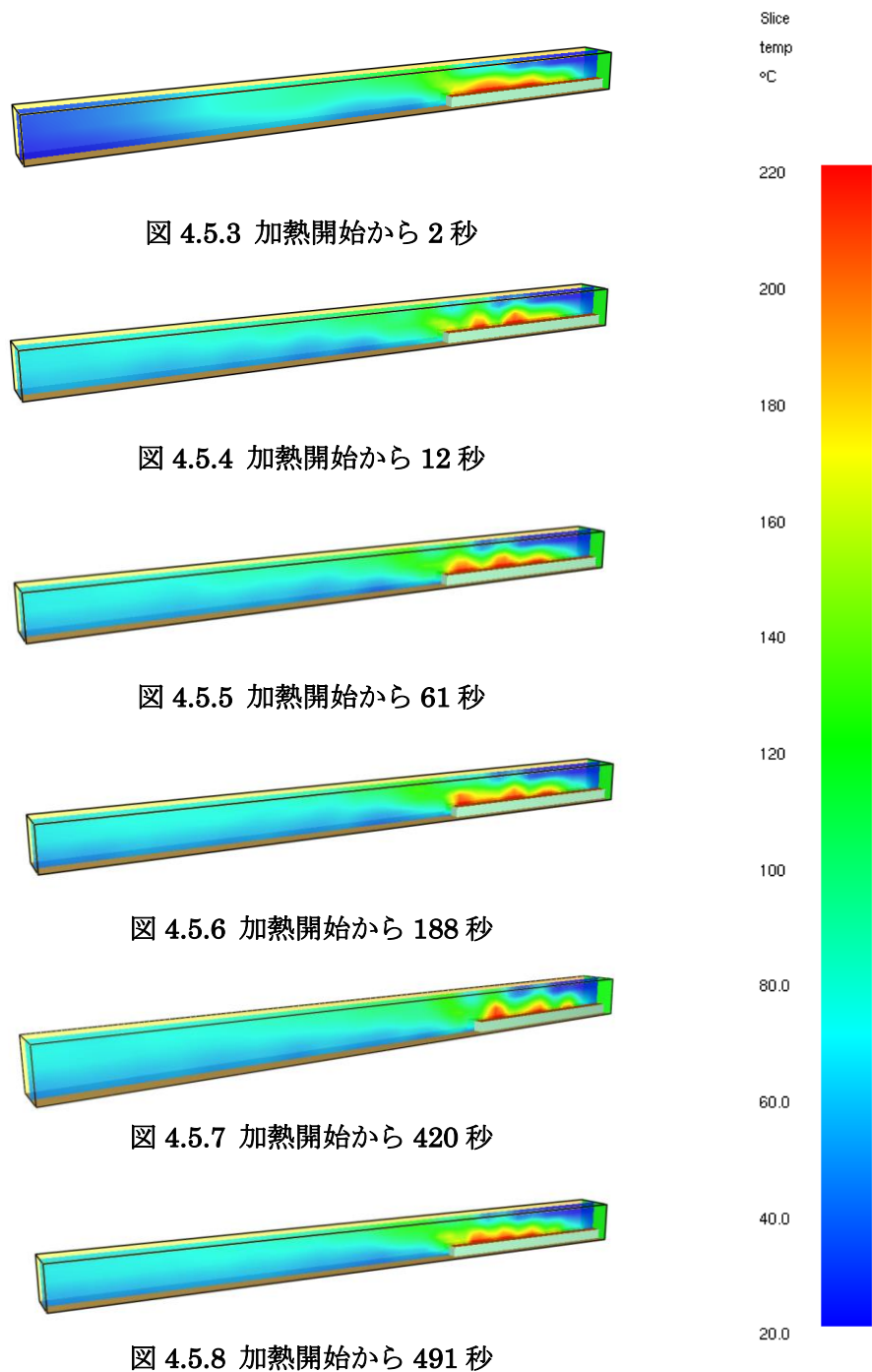


図 4.5.2 熱解析のモデル図



木材を stage2a で加熱した際の出口中央に設置した熱電対の温度およびブランク試験時の温度を図 4.5.9 に示す。実際の結果よりもシミュレーションの温度が低く、時間経過に伴う温度変化の再現ができなかった。これは以下の理由が考えられる。

試験体ボードの位置を固定したことによって燃焼位置から測定位置までの距離を再現できなかった。

加熱による温度上昇を評価できなかった。

現状では技術の不足により、正確に評価することはできなかった。

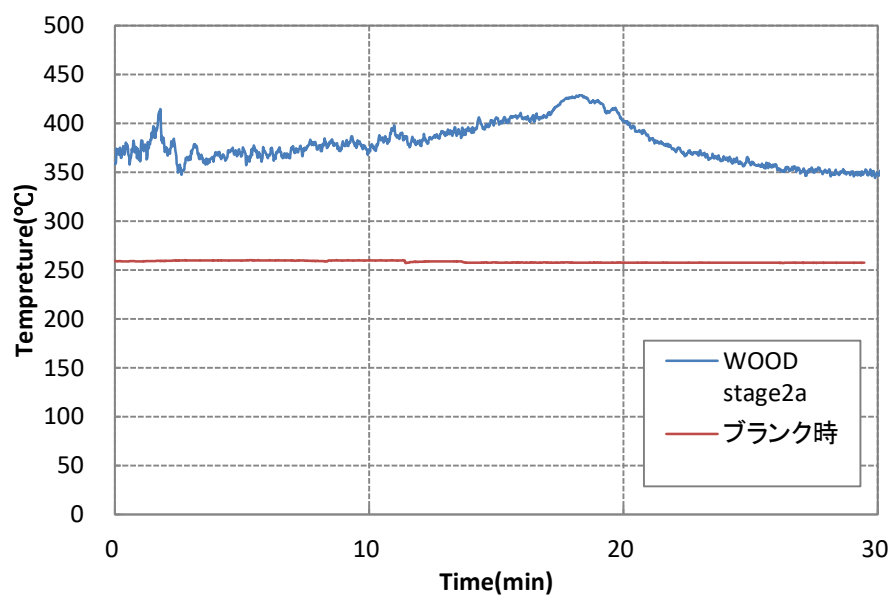


図 4.5.9 木材加熱時の温度

4.2 簡略チューブ炉

簡略チューブ炉を用いて加熱試験を行った。簡略チューブ炉と ISO チューブ炉の違いを表 4.6.1 に示す。ISO チューブ炉を用いて実験を行った結果、火災進展段階ごとの毒性値を得ることができたが、加熱温度や酸素濃度に対する生成物の関係を得ることは、燃焼環境が複雑であるため、求めることができなかった。ISO19700 のチューブ炉と比較すると簡略チューブ炉は、試験体の試験体ボードが短く、二次空気を入れる攪拌チャンバーがないため、試験体の量が少量で済むことや、清掃が容易、実験時間が短いなどの長所が挙げられる反面、安定した燃焼区間を得ることが難しく、試験体ボードを挿入する速度によって実験結果にバラつきが生じるなどの短所が考えられる。よりシンプルな燃焼環境である簡略チューブ炉を用いて実験を行い、燃焼条件と生成物の関係を比較した。両チューブ炉を比較し、結果の違いを明らかにすることにより、目的に応じて適切な試験方法の選択を可能にすることを目的とする。

表 4.6.1 簡略チューブ炉と ISO チューブ炉の違い

	長所	短所
ISOチューブ炉	安定した燃焼区間	燃焼環境が複雑 手順や清掃が複雑
簡略チューブ炉	燃焼環境シンプル 手順や清掃が簡単	結果にばらつきが生じやすい

4.2.1 実験概要

4.2.1.1 試験装置

写真 4.1.1 に簡略チューブ炉の写真を示す。加熱炉の加熱部の長さは 60.96 cm であり、温度コントロールは加熱炉上部中央に設置された熱電対によって制御を行っている。写真 4.1.2 に試験体ボードを示す。試験体を乗せた試験体ボードを加熱炉の中心部に挿入し、熱分解もしくは燃焼反応が終了するまで測定を行い、実験を行った。



写真 4.6.1 正面から見た簡略チューブ炉

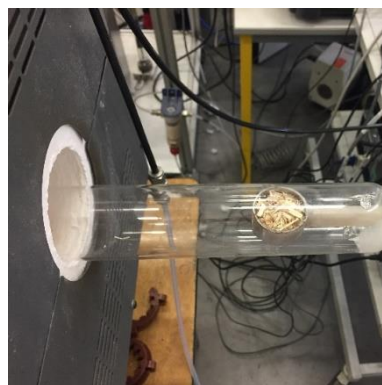


写真 4.6.2 試験体ボード

4.2.1.2 試験体・実験条件

試験体はポリ塩化ビニル、木材、高密度ポリエチレン、アクリル樹脂の 4 種類に対して実験を行った。試験体の成分比⁵⁾⁶⁾⁷⁾を表 4.6.2 に示す。試験体質量は試験体ボードの容量で決め、表 4.6.3 に示す。加熱条件は ISO に定められた火災進展段階に従って定め、表 4.6.4 に示す。酸素濃度 21%以下の実験条件については、窒素と空気を混合して、酸素濃度計による測定値が目標値になるよう調整を行い、実験を行った。ISO19706 の火災進展段階条件については表 4.6.5 に示す。ISO19706 の詳細については 2.5 節に記す。

表 4.6.2 試験体成分比

試験体	成分比								
	C	H	O	N	Cl	S	Ca	その他	合計
PVC	39.9	4.9	17.3	0.3	21.9	1.5	14	0.5	<100.3
WOOD	47.39	6.18	40.69	<0.10	0.73	0.31		4.6	<100
HDPE	85.50	14.1	<0.3	<0.1	0.6	<0.2			<100.8
PMMA	59.1	7.9	31.9	<0.3	0.1	<0.2		0.6	<100.1

表 4.6.3 試験体の質量

	PVC	WOOD	HDPE	PMMA
質量(g)	5.47	1.84	5.25	9.25

表 4.6.4 加熱条件

	stage1b	stage2a	stage3a-15	stage3a-18	stage3b
温度(°C)	350	650	650	650	825
酸素量(%)	21	21	15	18	15

表 4.6.5 ISO19706 の火災進展段階の条件⁸⁾

Fire Stage	熱 (KW/m2)	最高温度(°C)		酸素(%)		当量比	Vco/Vco2	燃焼効率(%)
		燃料	煙	IN	OUT			
無点火								
1a 自己燃焼型	該当なし	450-800	25-85	20	0-20	-	0.1-1	50-90
1b 酸素熱分解型	-	300-600		20	20	<1		
1c 無酸素外部輻射型	-	100-500		0	0	>>1		
完全燃焼点火								
2 完全燃焼点火型	0-60	350-650	50-500	~20	0-20	<1	<0.05	>95
過剰燃焼点火								
3a 低換気ルーム火災	0-30	300-600	50-500	15-20	5-10	>1	0.2-0.4	70-80
3b フラッシュオーバー	50-150	350-650	>600	<15	<5	>1	0.1-0.4	70-90

4.2.2 実験結果

FTIR を使って測定して得たガス成分分析の結果を示す。

ISO19700 のチューブ炉では、以下のような結果となった。

刺激的影響については、PVC、WOOD、HDPE は stage1b が最大となり、PMMA、NYLON6,6 は stage3a が最大となった。窒息的影響については、PVC、HDPE は stage2a が最大となり、WOOD、PMMA、NYLON6,6 は stage3b が最大となった。

それに対して、簡略チューブ炉では、刺激的影響については、PVC、PMMA は stage3b WOOD は stage3a-18、HDPE は stage2a で最大となった。HDPE、PMMA、PVC が stage2a において、窒息的影響について最大となった。WOOD については stage3a-18 で最大となった。

両者を比較すると、窒息的影響の傾向として、PMMA および WOOD 以外については一致した結果となった。刺激的影響の傾向については、一致しなかった。この原因として、簡略チューブ炉では刺激種のホルムアルデヒドおよびアクロレインが計測できなかったため、正確な評価ができてないことが考えられる。

4.2.2.1 ポリ塩化ビニル (PVC)

ポリ塩化ビニルのガス成分分析結果を図 4.7.4~4.7.5 に示す。HCl が多く生成し、一番多く生成した燃焼条件は stage3b であった。CO が一番多く生成したのは、stage2a が一番多く生成した。

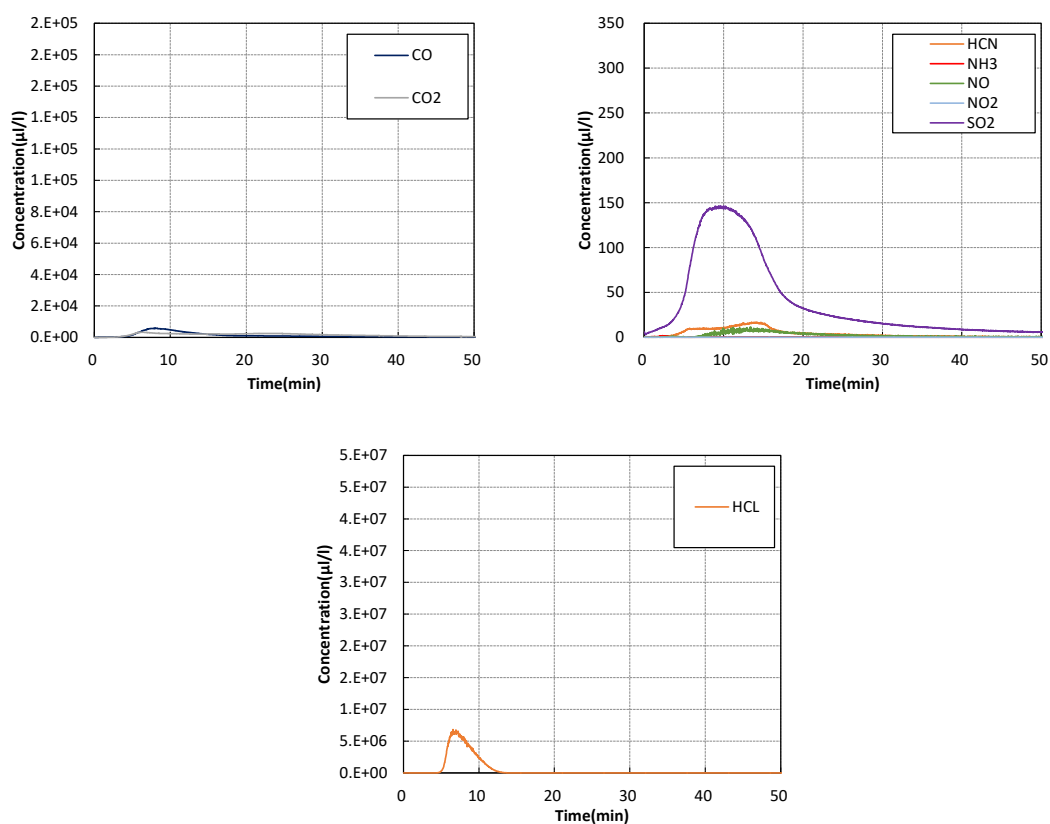


図 4.7.1 PVC の stage1b のガス成分分析結果

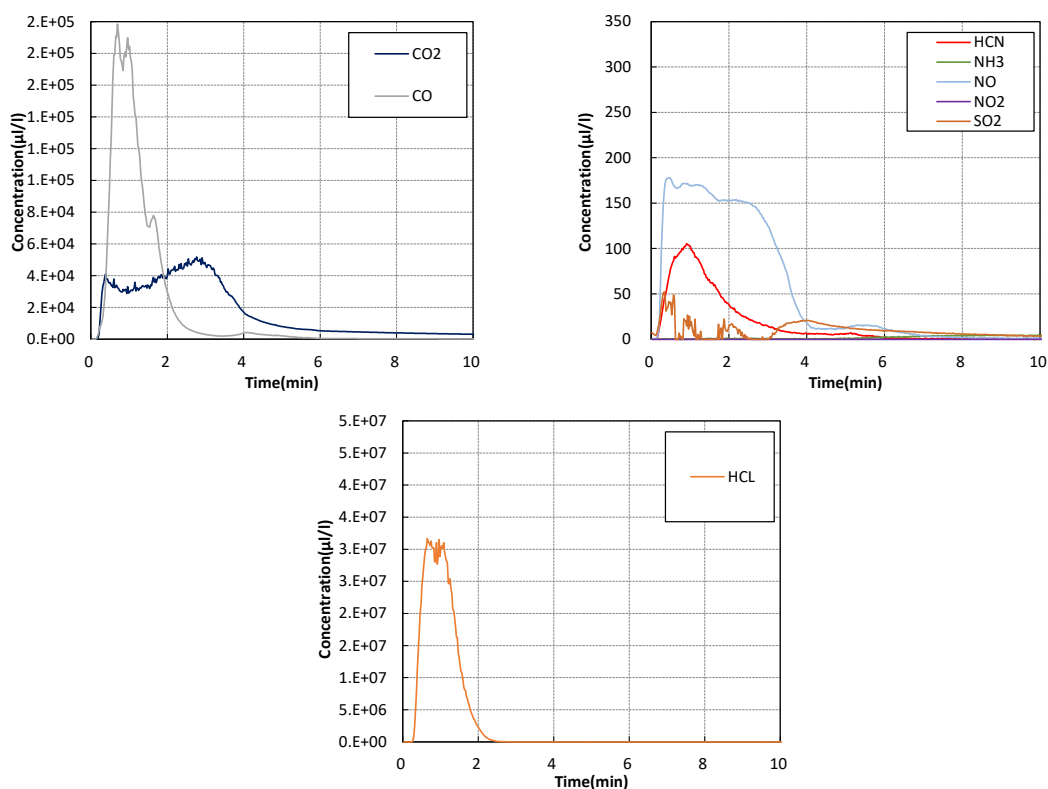


図 4.7.2 PVC の stage2a のガス成分分析結果

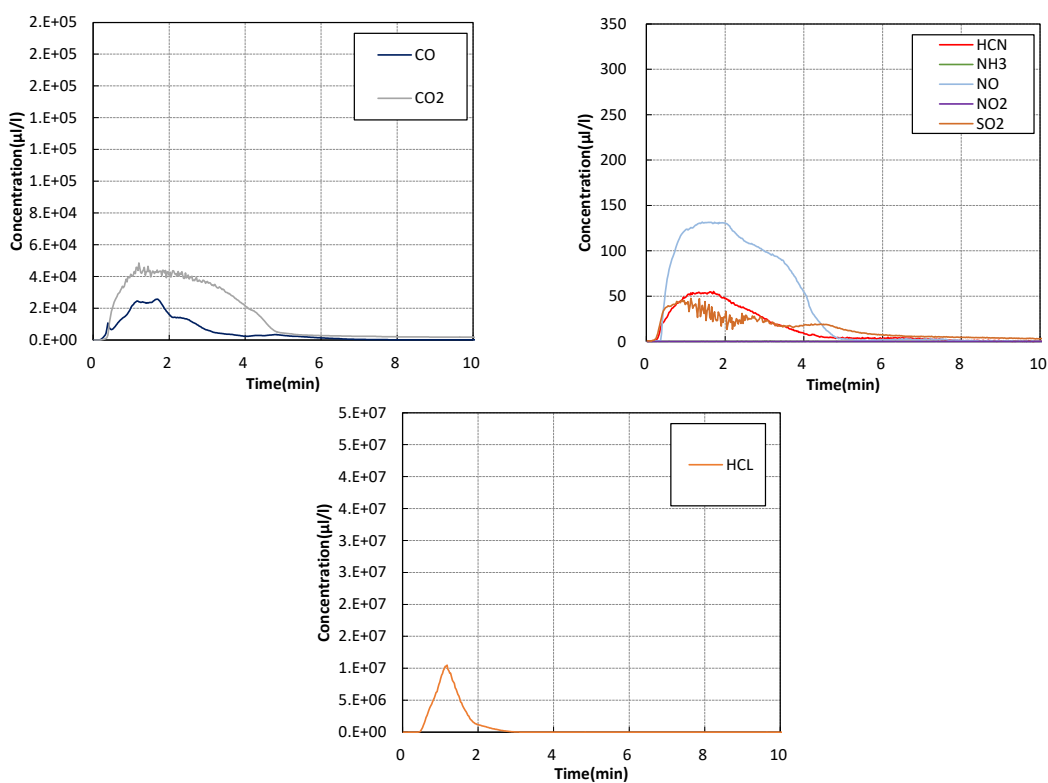


図 4.7.3 PVC の stage3a-15 のガス成分分析結果

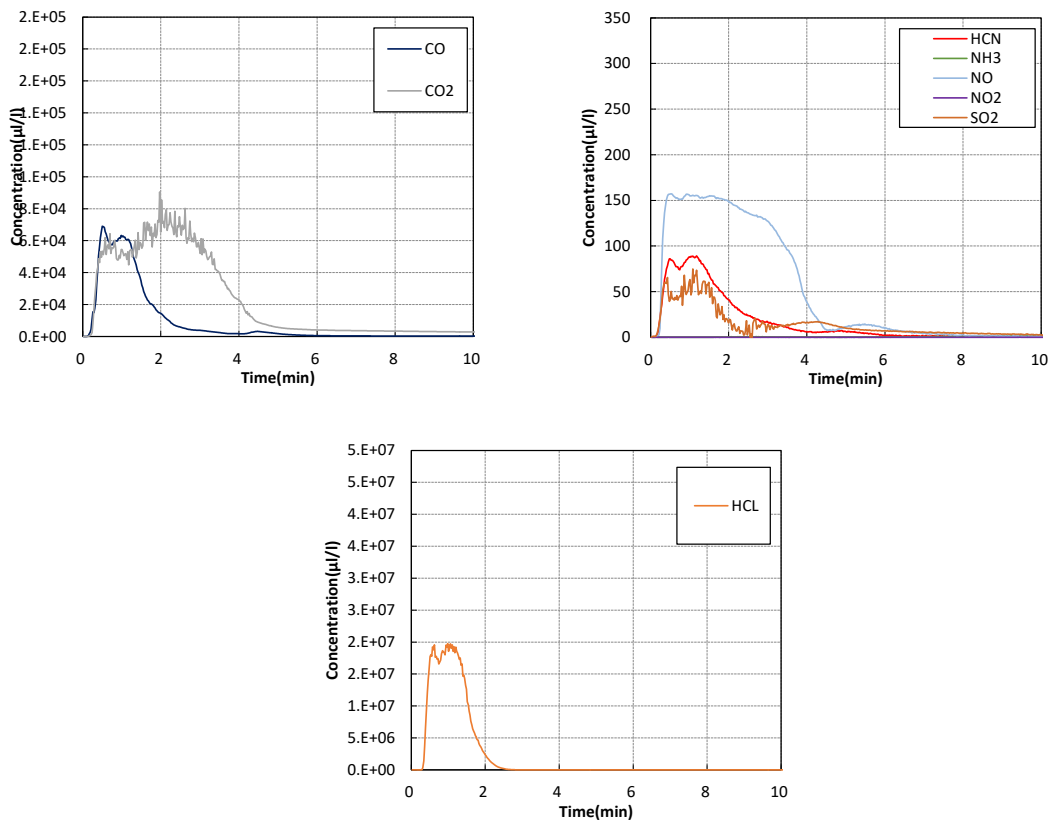


図 4.7.4 PVC の stage3a-18 のガス成分分析結果

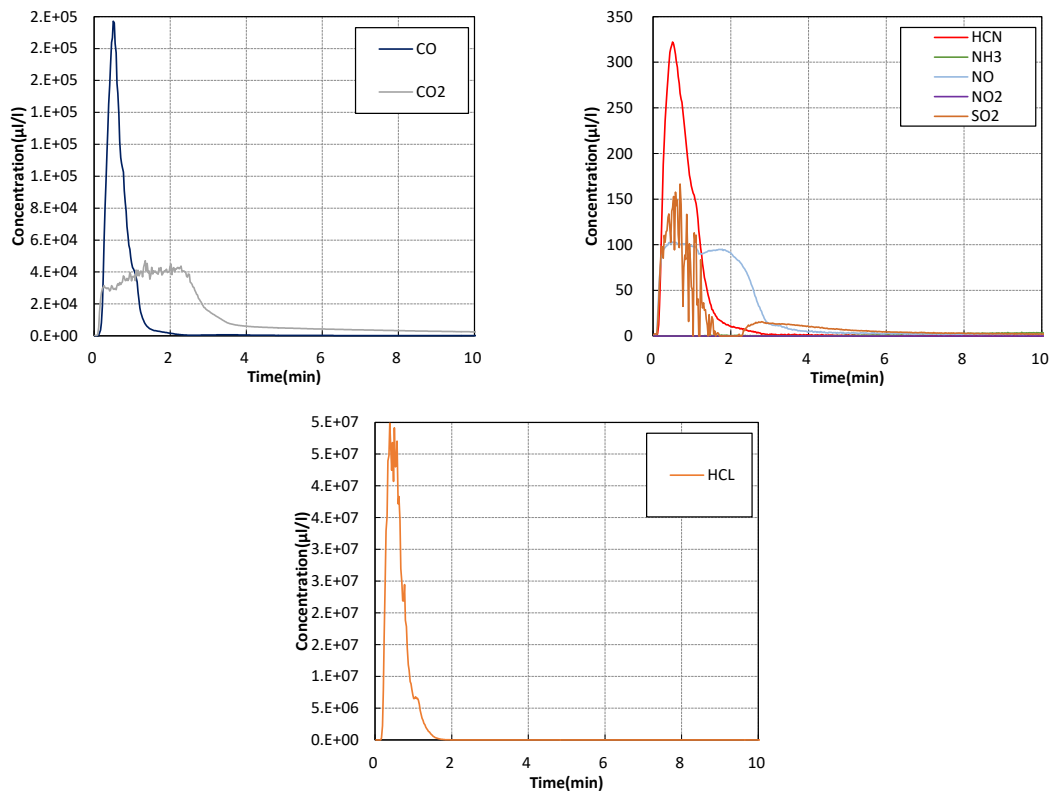


図 4.7.5 PVC の stage3b のガス成分分析結果

4.2.2.2 木材 (WOOD)

木材のガス成分分析結果を図4.7.6～4.7.10に示す。木材はstage3a-15でCOが最大になり、stage3a-18でHClとHCNの生成量が最大であった。Stage3a-18とstage3bはHCNのほかにNH₄も多く生成した。

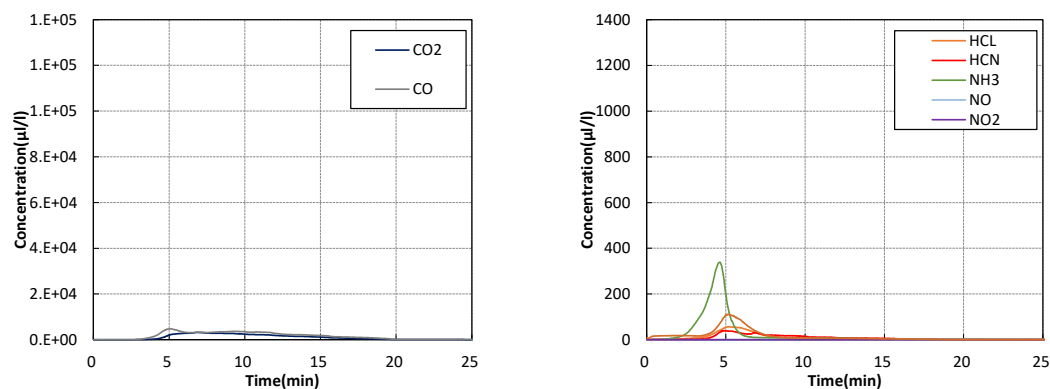


図 4.7.6 WOOD の stage1b のガス成分分析結果

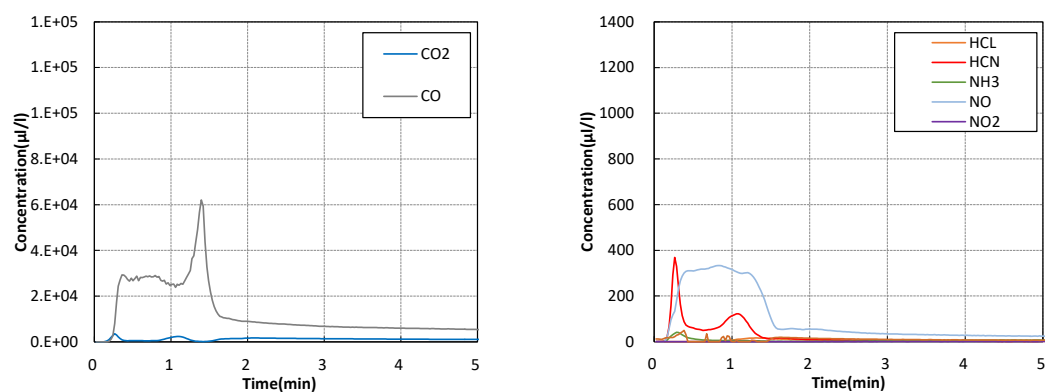


図 4.7.7 WOOD の stage2a のガス成分分析結果

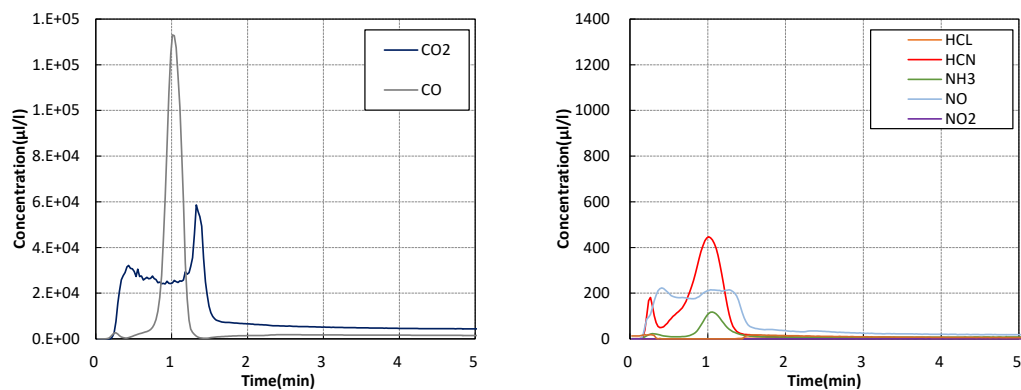


図 4.7.8 WOOD の stage3a-15 のガス成分分析結果

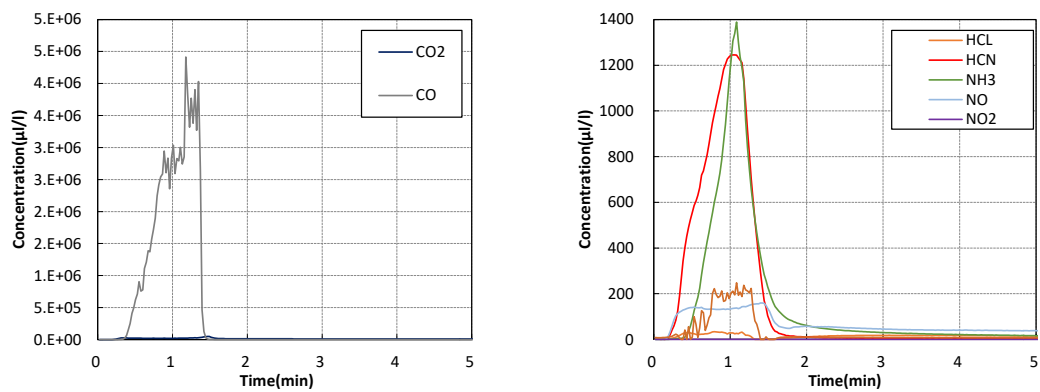


図 4.7.9 WOOD の stage3a-18 のガス成分分析結果

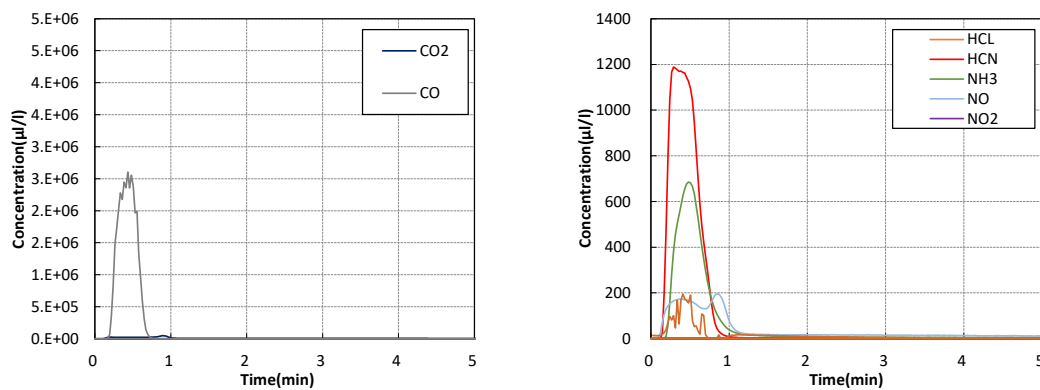


図 4.7.10 WOOD の stage3b のガス成分分析結果

4.2.2.3 高密度ポリエチレン (HDPE)

高密度ポリエチレンのガス成分分析結果を図 4.7.11～4.7.15 に示す。Stage2a では CO と HCl が多く生成した。

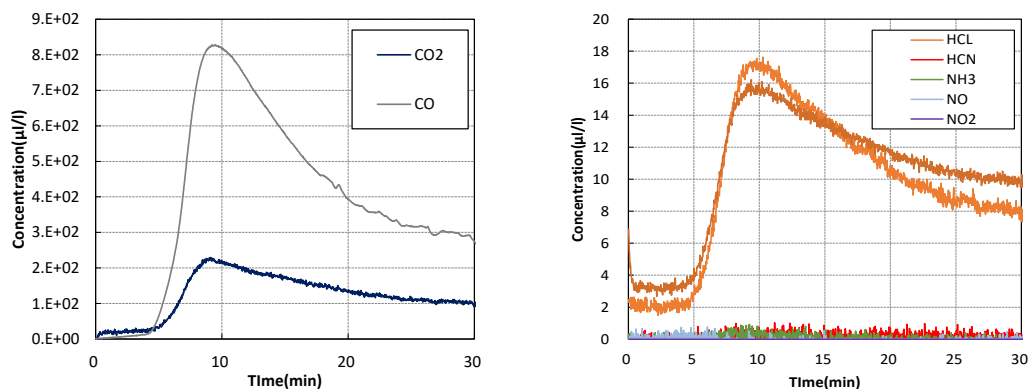


図4.7.11 HDPEのstage1bのガス成分分析結果

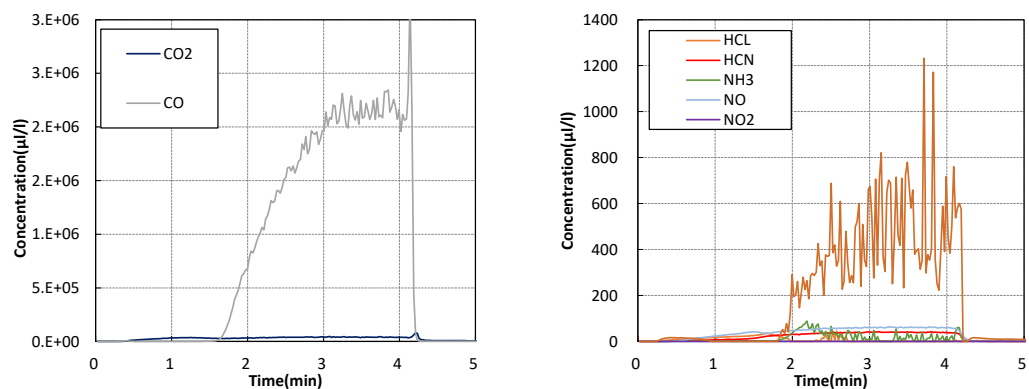


図4.7.12 HDPEのstage2aのガス成分分析結果

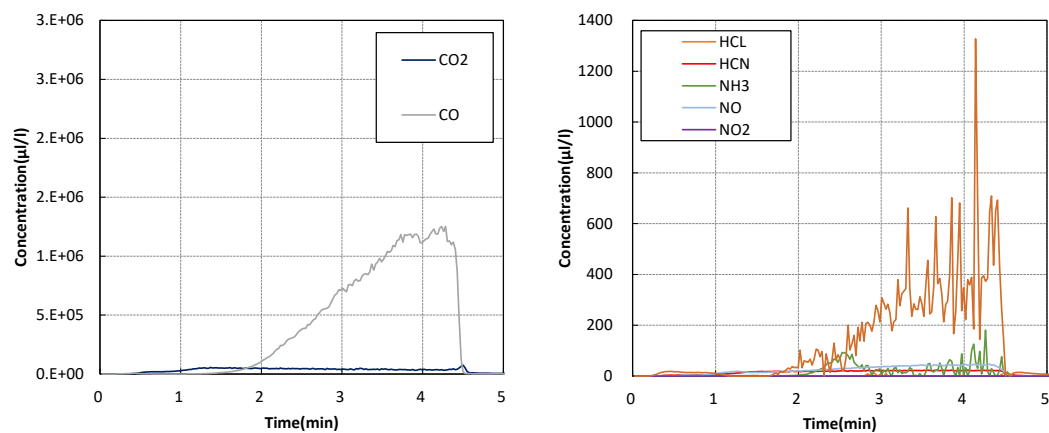


図4.7.14 HDPEのstage3a-15のガス成分分析結果

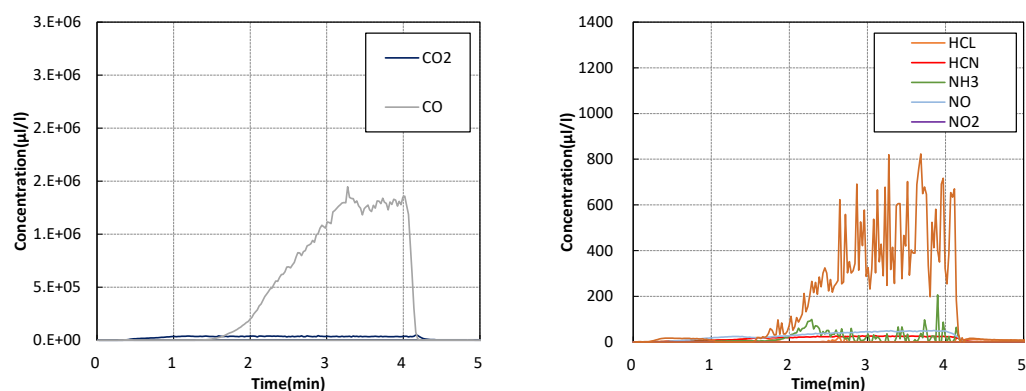


図4.7.14 HDPEのstage3a-18のガス成分分析結果

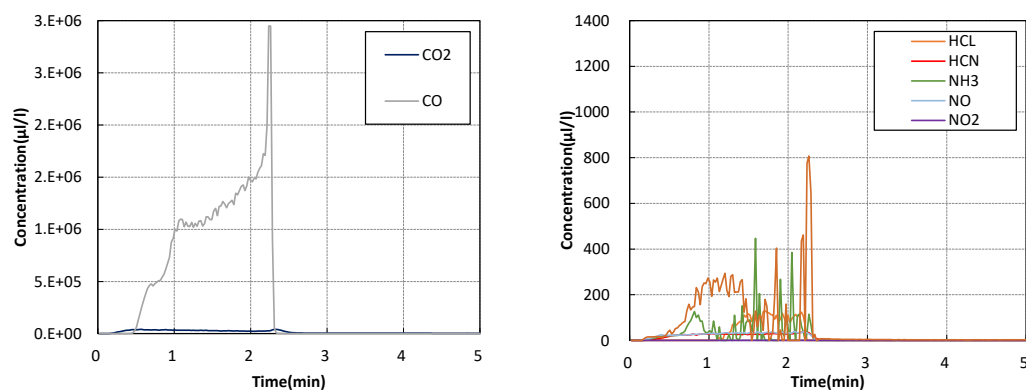


図4.7.15 HDPEのstage3bのガス成分分析結果

4.2.2.4 アクリル樹脂 (PMMA)

アクリル樹脂のガス成分分析結果を図 4.7.16～4.7.20 に示す。stage2a が一番多くの SO_2 と CO が生成した。

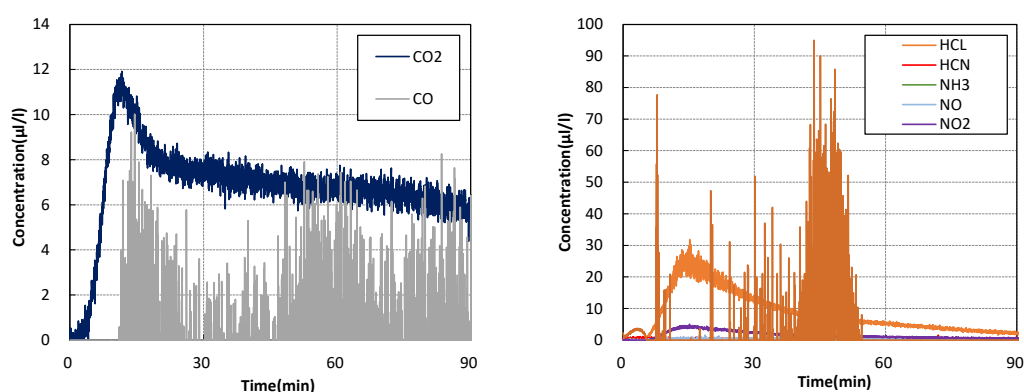


図4.7.16 PMMAのstage1bのガス成分分析結果

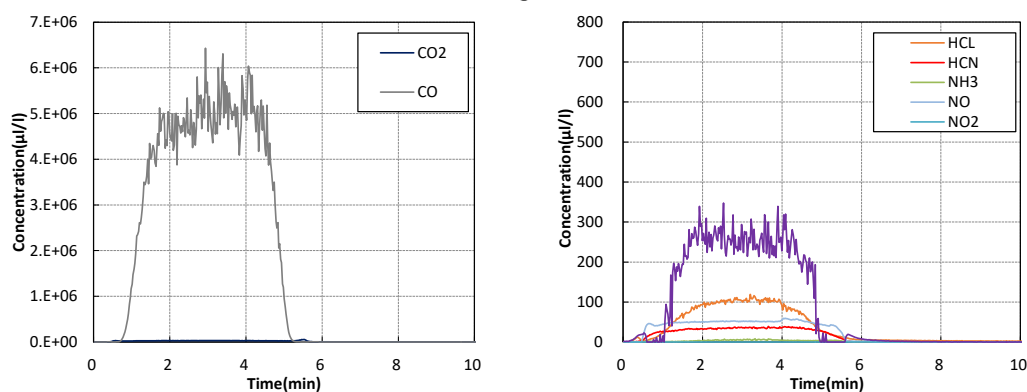


図4.7.17 PMMAのstage2aのガス成分分析結果

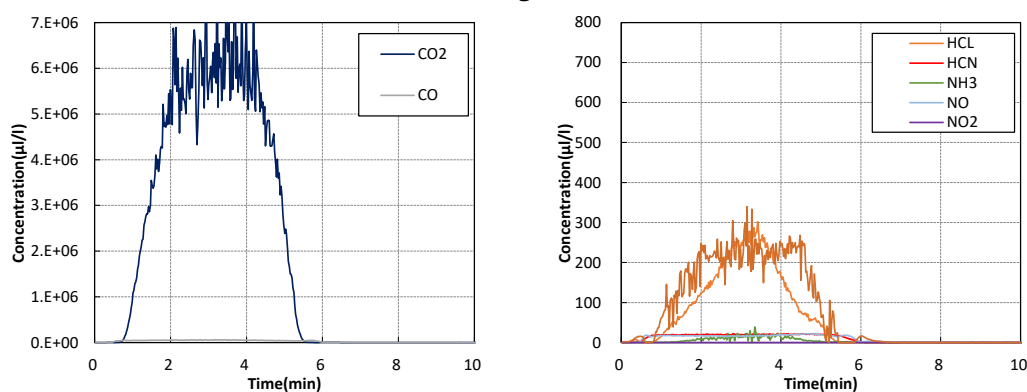


図4.7.18 PMMAのstage3a-15のガス成分分析結果

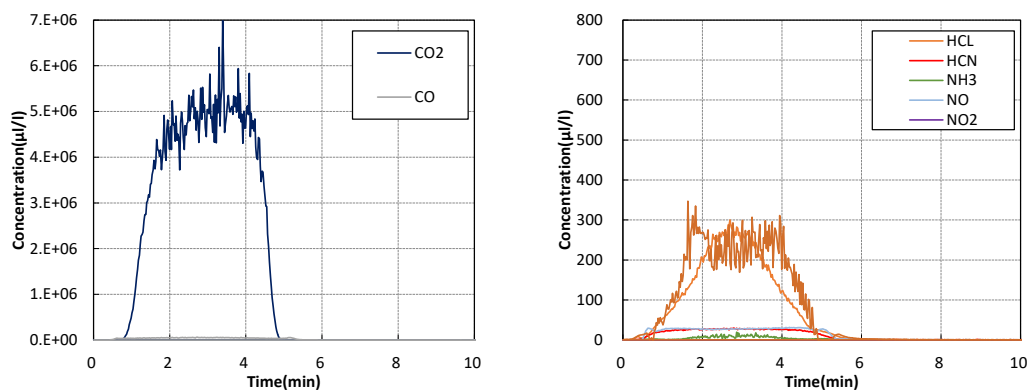


図4.7.19 PMMAのstage3a-18のガス成分分析結果

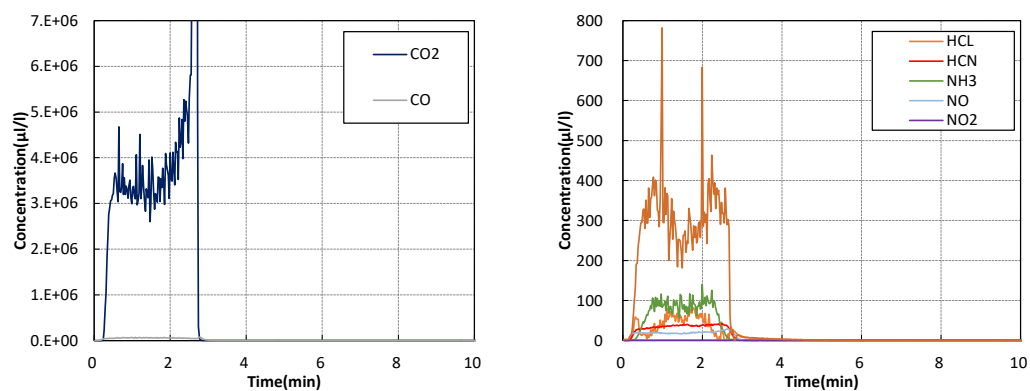


図4.7.20 PMMAのstage3bのガス成分分析結果

4.3 チューブ炉の比較

4.3.1 CO/CO₂ 比較

各材料のCO/CO₂比を計算し、図4.8.1～4.8.5に示す。グラフに示すそれぞれの値の積分値を計算したものが表4.8.1となる。CO/CO₂比は大きいほど不完全燃焼であったことを示す指標であり、燃焼に対する酸素の能力を示し、色んな燃焼状況を示す。2章5節では火災ステージ、CO/CO₂比が似た実験である場合のみ、実験間の比較が可能である。表4.8.2にチューブ炉のCO/CO₂比を示し、その結果を図4.8.6示す。グラフ横軸の1、2、3、4がそれぞれステージ1b、2a、3a、3bに対応している。図4.8.6より、PVCは全火災ステージに対し概ね一致した。PMMAはstage2a以外、概ね一致した結果となった。木材についてはstage2aおよび3b以外、概ね一致した結果となった。HDPEとLDPEについては、試験体材料が異なるため、簡略チューブ炉の結果がより大きい値となった。この結果と4.6.2節のガス成分分析の結果を比較すると、窒息性影響については、チューブ炉と簡略チューブ炉の関係は一致していることがわかる。このことから、CO/CO₂比が一致しており、火災ステージが同一の実験間について、有害性ガスの比較が可能であることが確かめられ、条件が満たされた場合、チューブ炉の代わりとして、簡略チューブ炉を用いることが可能だと考えられる。

また、材料種別ごとに火災ステージ間について比較をした場合、PVCやPMMAはstage3aにおいて酸素15%と18%のCO/CO₂がほとんど同じであったが、木材とHDPEについては大きく異なった。これは、木材やHDPEの材質の均一さが関係していると考えられる。

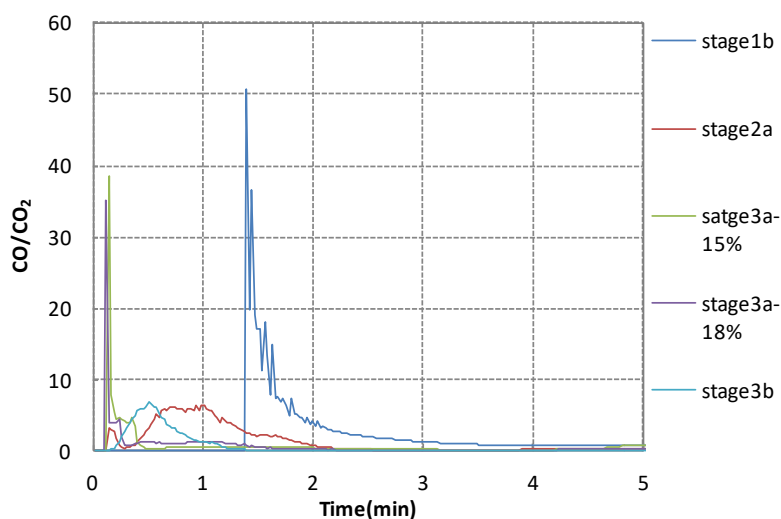


図4.8.1 PVCの結果

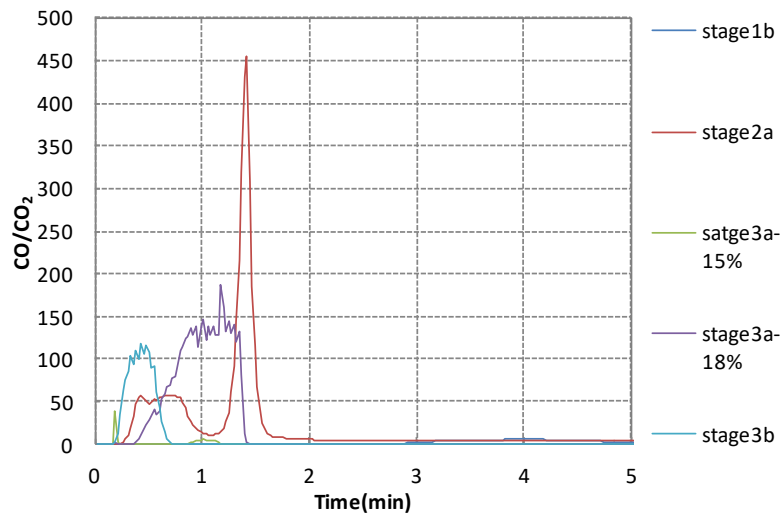


図4.8.2 WOODの結果

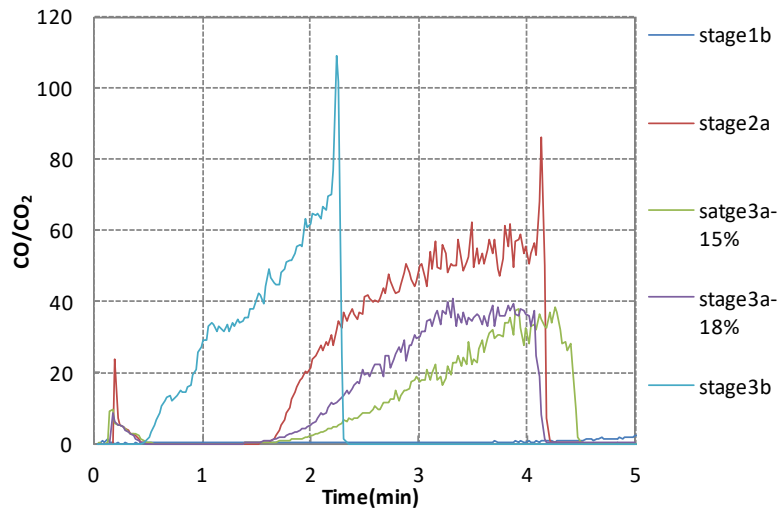


図4.8.3 HDPEの結果

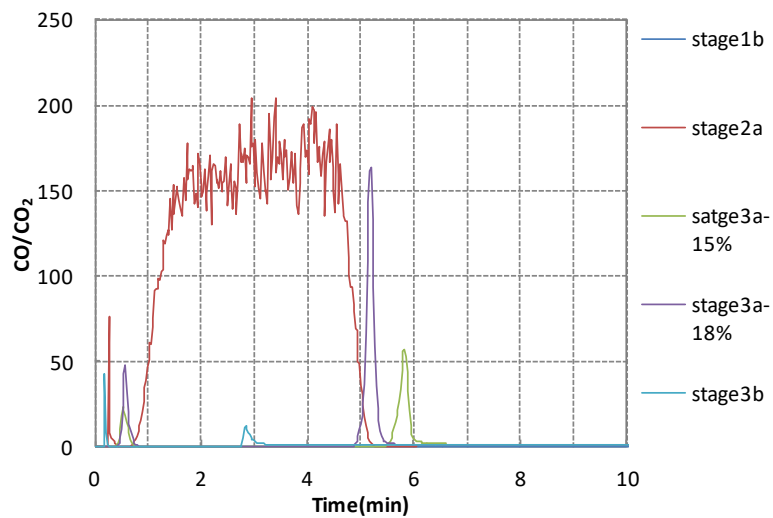


図4.8.4 PMMAの結果

表 4.8.1 簡略チューブ炉の CO/CO₂ 結果

	stage1b	stage2a	stage3a-15%	stage3a-18%	stage3b
PVC	1.00	1.04	0.31	0.36	0.68
WOOD	1.50	8.32	0.57	19.20	11.97
HDPE	3.09	26.35	10.50	14.16	23.78
PMMA	0.08	113.71	0.01	0.01	0.01

表 4.8.2 チューブ炉の CO/CO₂ 結果

	stage1b	stage2a	stage3a	stage3b
PVC	0.91	2.44	1.65	0.01
WOOD	0.02	0.03	0.64	0.55
LDPE	0.22	0.18	0.01	0.03
PMMA	0.00	0.03	0.02	0.30

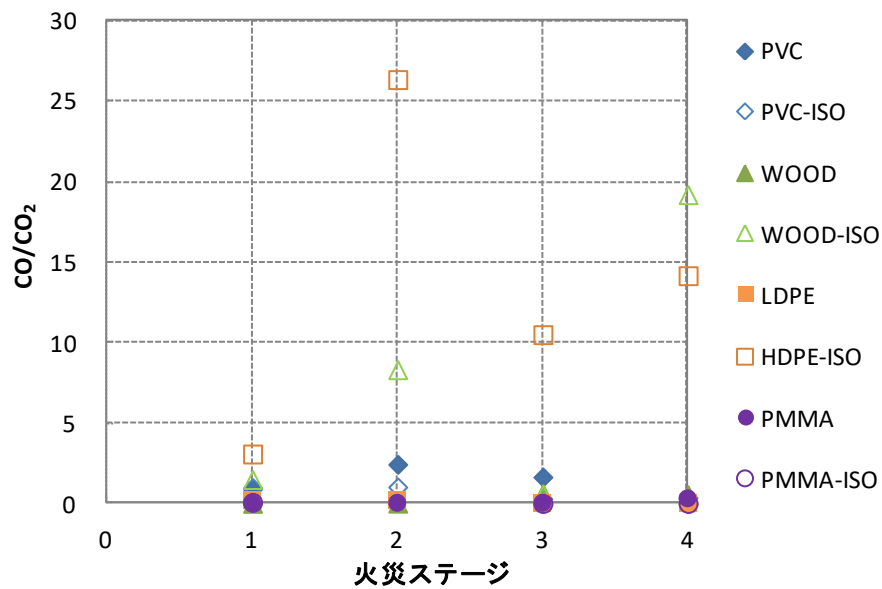


図 4.8.6 簡略チューブ炉と ISO チューブ炉の比較

4.3.2 当量比比較

木材、PVC、PMMA、HDPE、について、ISO チューブ炉および簡略チューブ炉それぞれの実験条件の当量比を計算し、比較を行った。当量比 Φ は燃料の濃さを表す数値として用いられ、実際の混合気の燃空比と理論燃空比の比で求められる⁹⁾。 Φ 結果を表 4.8.3 および 4.8.4 に示す。

表 4.8.3 ISO チューブ炉の当量比結果

		stage1b	stage2a	stage3a	stage3b
ISO チューブ炉	PVC	0.65	0.26	5.77	5.77
	WOOD	0.56	0.22	2.87	3.11
	LDPE	1.42	0.28	3.71	3.12
	PMMA	0.81	0.16	1.83	1.98

表 4.8.4 簡略チューブ炉の当量比結果

		stage1b	stage2a	stage3a-18%	stage3a-15%	stage3b
簡略チューブ炉	PVC	0.66	0.36	0.34	0.34	0.50
	WOOD	0.41	0.11	0.42	0.42	0.83
	HDPE	0.10	1.92	2.76	2.39	2.59
	PMMA	2.79	0.93	1.17	1.18	1.95

ISO チューブ炉と簡略チューブ炉を比較すると、PVC や木材の stage1b と 2a、PMMA の stage3a と 3b では当量比がほぼ同じであった。しかし、HDPE や PMMA の stage1b と 2a、PVC や木材の stage3a、3b は大きく異なる結果となった。

以上のことから、CO/CO₂ および当量比ともに近い値となったのは、PVC の stage1b と 2a、PMMA の stage2a と 3b、木材の 1b であった。ISO チューブ炉と簡略チューブ炉の間で似た燃焼条件を得ることが可能である。他の加熱条件については、試験体質量や空気量を変更することによって似た燃焼条件を得ることができることが考えられるが、実験によって確かめる必要がある。

4.4 まとめ・今後の課題

チューブ炉を使い、燃焼実験を行い、以下のことが明らかになった。

1. ポリ塩化ビニル、木材(スギ; 無処理)、低密度ポリエチレン、アクリル樹脂について、各火災進展段階に生成する有害性ガスの種類および濃度を測定した。
2. X_{FED} 、 X_{FEC} を計算し、各火災進展段階における有害・有毒性を明らかにし、有害な影響がピークになる火災進展段階が材料によって異なることが明らかにした。
3. 材料の種類ごとに有害性ガスの発生する傾向を示し、火災における燃焼条件と燃焼生成物の関係を明らかにした。
4. X_{FED} に対し、安定した燃焼区間における増加割合を求め、実火災時の X_{FED} の毒性予測を可能にする予測係数、 $\Delta X_{FED}/\Delta t$ を計算した。

また、簡略チューブ炉を使い、実験を行い、ISO チューブ炉と比較を行った結果、以下のことが明らかになった。

5. CO/CO_2 比および当量比が一致している燃焼条件を確かめ、火災ステージが同一であれば、チューブ炉の代わりとして、簡略チューブ炉を用いることが可能である。

今後の課題については、

1. 燃焼温度を正確に求めるため、FDS 解析を行ったが、温度を再現できなかった。試験体ボードを移動させ、輻射熱を考慮に入れてシミュレーションを行う必要があり、燃焼条件が比較的簡単である簡略チューブ炉に対しても、熱解析を行う予定です。
2. 簡略チューブ炉と ISO チューブ炉を比較する際に、当量比および CO/CO_2 が合わなかった条件に対して、今後条件を変えて実験によって再度確かめる予定である。

参考文献

- 1)日本火災学会: 火災と建築, 4.4 区画火災, 共立出版株式会社,p93(2008)
- 2)原田和典: 建築火災のメカニズムと火災安全設計
- 3)塩ビと建設材料 土木・設備から建築材料まで 塩ビ工業会・環境協会 塩化ビニル環境対策協議会
- 4)阿部伸之: CFDを用いた火災の数値シミュレーション, 日本流体力学学会数値流体力学部門Web会誌, 第12巻,第2号,2014
- 5) Jocelyn Luche, Etienne Mathis, Thomas Rogaume, Franck Richard, Eric Guillaume: High-density polyethylene thermal degradation and gaseous compound evolution in a cone calorimeter, Fire Safety Journal 54 (2012) 24–45
- 6) Jocelyn Luche, Thomas Rogaume , Franck Richard , Eric Guillaume: Characterization of thermal properties and analysis of combustion behavior of PMMA in a cone calorimeter, Fire Safety Journal 46 (2011) 451–461
- 7) Anna A.Stec, PeterFardell, PerBlomqvist , LucasBustamante-Valencia , Laurent Saragoza , EricGuillaume: Quantification of fire gases by FTIR: Experimental characterization of Calibration systems, Fire Safety Journal Volume 46, Issue 5, July 2011, Pages 225-244
- 8)ISO19706 :2011(E) Guideline for assessing the fire threat to people
- 9)埼玉工業大学小西克享:燃焼の理論入門,第 5 章燃焼計算, p21

第 5 章 有害性ガスの影響を考慮した避難安全設計手法

5.1 代替手法の提案

図 5.1 に避難安全性における許容避難時間と避難所要時間の関係を示す。火災時の人命安全を判断する基準として、許容避難時間が避難所要時間より長いかが挙げられる(図 5.1(a))。

避難所要時間とは、避難者が避難開始時から安全な場所まで移動するのに必要な時間であり、許容避難時間とは、避難者がその後の生活を害されることなく、火災発生時の所在位置から安全な場所まで移動できる最長時間である。

有害ガスが持つ窒息性影響は、人体に甚大な害を与え、死亡または行動停止に至ら、許容避難時間を短くすることもあるが、許容避難時間が避難所要時間より長い場合、安全と判断される(図 5.1(b))。刺激性影響は、在館者の避難行動、移動速度、避難路の選択などを遅らせ、避難所要時間が平常時より長くなり、許容避難時間を超えてしまうことも考えられ、安全に避難できないリスクが高まる(図 5.1(c))。

以上のことにより、火災時に発生するガスの毒性を評価するためには、有害ガスの窒息性影響および刺激性影響の両方を考慮する必要がある。以下にその手法案を示す。

t_{escape} を避難所要時間、 t_{limit} を許容避難時間、 α を刺激性影響 X_{FEC} を評価した係数とする。

避難所要時間とは、在館者が自分で安全な避難場所に移動する有効な行動を取り、出火から安全な場所まで移動するのに必要な時間であり、避難開始時間や歩行時間、出口通過時間を含む¹⁾。

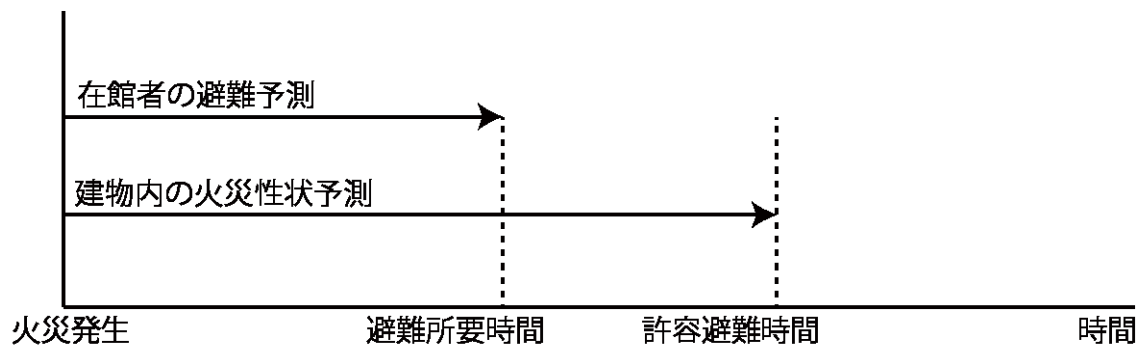
許容避難時間とは、出火から在館者が自分で安全な避難場所に移動する有効な行動を取れなくなる状態までの時間である。これは窒息性ガス、刺激性ガス、熱および煙による視界低下を考慮して予測した 4 つのそれぞれの時間のうちでもっとも短いものである¹⁾。

行動停止時間とは、出火から窒息性ガスの影響を受けて、避難者が窒息し、死亡に至るまでの時間である。

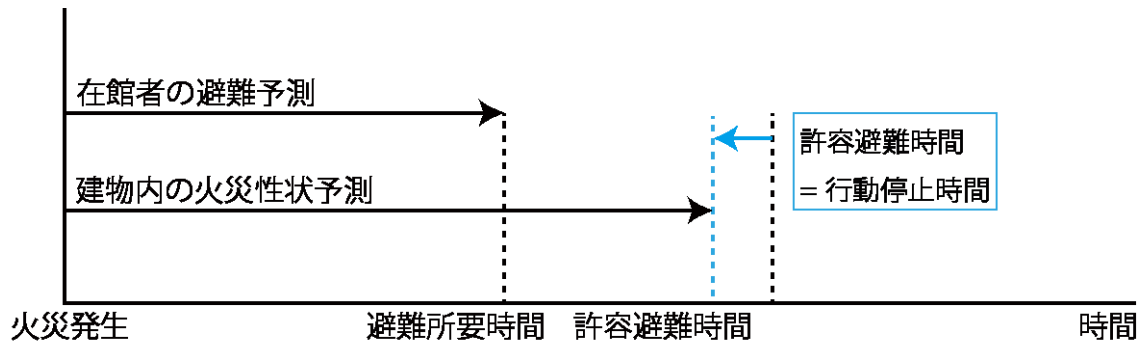
α は歩行速度の低下を評価した係数である。避難者の歩行速度の低下には、煙やガスなど様々な要因が考えられるが、本研究では、有害性ガスを窒息性影響と刺激性影響の二つとし、刺激性影響を与えるガスのみが歩行速度に影響を及ぼすものとし、検討を行った。以下の式が満たされた時、安全である。

$$t_{\text{limit}} > \alpha \cdot t_{\text{escape}} \quad \cdots \text{式 5.1.1}$$

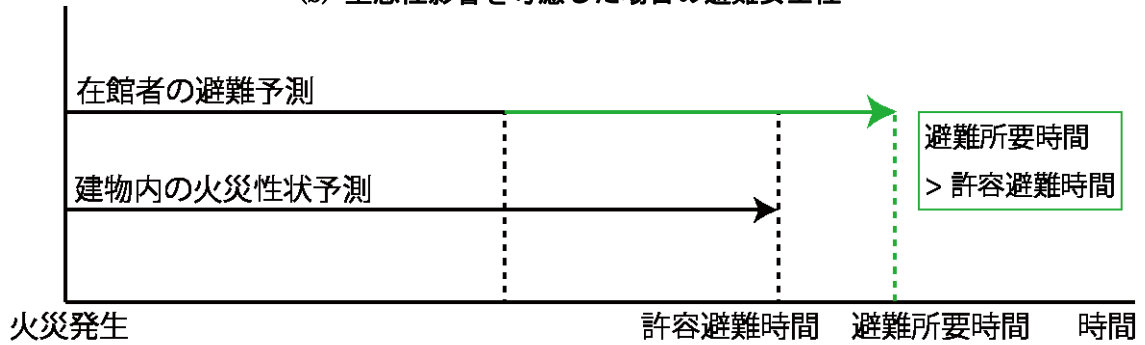
実際の建築物で有害ガスに曝露された人間の避難所要時間 t_{escape} を算出しなければならない。また、ガスの刺激性影響が歩行速度に与える係数 α もしくは歩行速度の低下を受けた避難所要時間を算出する必要がある。有害性ガスの刺激性影響および窒息性影響は有害性ガスの濃度に比例し、材料および燃焼条件と刺激性影響および窒息性影響の関係は 4 章で詳しく調べた。



(a) 有害ガスの影響を考慮しない場合の避難安全性



(b) 窒息性影響を考慮した場合の避難安全性



(c) 刺激性影響を考慮した場合の避難安全性

図 5.1.1 避難安全性の確認

避難所要時間の基本式を式 5.1.2 および 5.1.3 に示す。

(a) 出火室の場合

$$\begin{aligned} t_{start, room} &= 2\sqrt{A} \\ t_{move, room} &= \frac{l_{max, room}}{v} + \frac{P_{room}}{NB} \quad \cdots \text{式 5.1.2} \\ t_{escape} &= t_{start, room} + t_{move, room} \end{aligned}$$

$t_{start, room}$: 出火室の避難開始時間(s)

$t_{move, room}$: 出火室の行動避難時間(s)

$l_{max, room}$: 最大歩行距離(m)

A : 室床面積(m²)

v : 歩行速度(m/s)

P_{room} : 在館者数(人)

N : 流動係数(人/m・s)

B : 出口の幅(m)

(b) 出火階の場合

$$\begin{aligned} t_{start, floor} &= 2\sqrt{A_{floor}} + a \\ t_{move, floor} &= \frac{l_{max, floor}}{v} + \frac{P_{floor}}{NB_{min}} \quad \cdots \text{式 5.1.3} \\ t_{escape} &= t_{start, floor} + t_{move, floor} \end{aligned}$$

$t_{start, floor}$: 出火階の避難開始時間(s)

$t_{move, floor}$: 出火階の行動避難時間(s)

$l_{max, floor}$: 階避難対象エリアの各部から出火階の想定避難場所までの距離(m)

A : すべての室の床面積の合計(m²)

v : 歩行速度(m/s)

P_{floor} : 出火階の想定避難場所への出口を使用する要避難者数(人)

N : 流動係数(人/m・s)

B_{min} : 避難経路上において最小幅員の出口幅(m)

α は刺激性影響 X_{FEC} を評価した係数であり、刺激性影響を受けた際に歩行速度が低下することを考慮し、刺激煙の濃度や種類と避難者の歩行速度の関係から求めるものである。 α については 5.2 節で検討を行う。

5.2 刺激性ガスが歩行速度に与える影響

5.2.1 減光係数と歩行速度の関係

煙の中における刺激煙および無刺激煙の中の歩行速度と煙濃度を下図³⁾に示す。

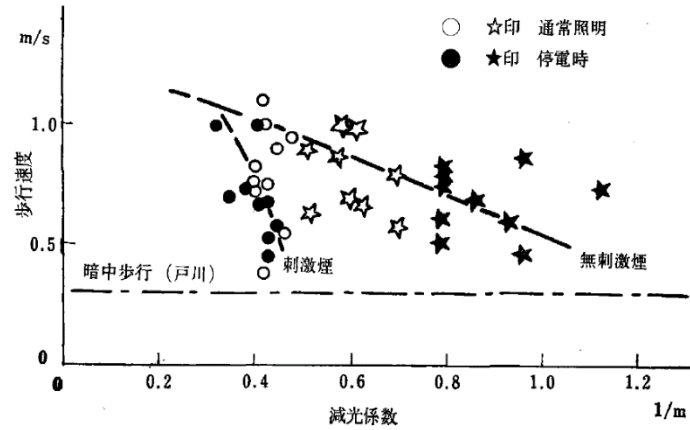


図 5.1.2 減光係数と歩行速度の関係

刺激煙は間隔を極端に狭めて置いた木材クリブを燃焼させることにより発生させられたものであり、刺激の比較的少ない無刺激煙は灯油を燃焼させることによって発生させられたものである。

刺激煙の近似一次関数 y_1 の2点を $(x,y)=(0.45, 0.5)$ 、 $(0.35, 1.0)$ とし、無刺激煙の近似一次関数 y_2 の2点を $(x,y)=(1.05, 0.5)$ 、 $(0.45, 1)$ とすると、 y_1, y_2 は次のようになる。

$$y_1 = -5x + \frac{11}{4}$$

$$y_2 = -\frac{5}{6}x + \frac{11}{8}$$

同じ煙濃度に対して歩行速度を比較すると、

$$\alpha = \frac{y_2}{y_1}$$

とすると、

$$\alpha = \frac{33-20x}{55-120x} \quad \dots \text{式 5.1.3}$$

刺激煙が歩行速度に与える影響 a_{irr} は、有効濃度率 X_{FEC} と比例関係にあると仮定するとし、今回のチューブ炉の実験で stage2 における木材の有効濃度率 X_{FEC} の値が 0.47 であり、 a_{irr} は α は刺激性影響を受けた歩行速度の低下を表した係数であるため、1 以下になることから、

$$\alpha_{irr} = \frac{X_{FEC,irr}}{0.47} \frac{33-20x}{55-120x} \quad \dots \text{式 5.1.4}$$

として求めることができる。

式 5.1.1 および式 5.1.2 に $v_{FEC} = \alpha v$ を代入し、煙の中での刺激性影響を考慮した避難所要時間が求められる。

5.2.2 SDC 試験による減光係数と X_{FEC} の関係

木材の煙生成量と刺激性影響の関係を調べるため、ISO5659-2 および JIS K 7242-2 に定められている発煙性試験装置を用いて加熱試験を行い、FTIR でガス成分分析を行った。実験条件は下記の通りとした。ガス成分分析の結果および測定された比光学密度 D_s の結果をそれぞれ図 5.2.1 と図 5.2.2 に示す⁴⁾。

1. 加熱強度：25kW/m²
2. 試験体への着火源あり（Flaming 試験・・・ISO5659-2 規格に従ったプロパンバーナーにより、試験体の上方に火炎を放射し続けて、試験体より発生する熱化学蒸気を完全燃焼させるための機構）
3. 試験時間：30 分
4. 詳細な試験手順は、全て ISO5659-2 規格に従う
5. FTIR 装置・・・ガス有害性試験装置およびチューブ炉へ接続した装置と同じ（FTTOEM 製 CCGMS）
6. FTIR 及び SDC の接続方法・・・ISO19702：2006 年版の現行規格に従う。（FTIR～SDC のサンプリングラインは、全て 180℃にて加熱されている。加熱されていない部分はなし。）

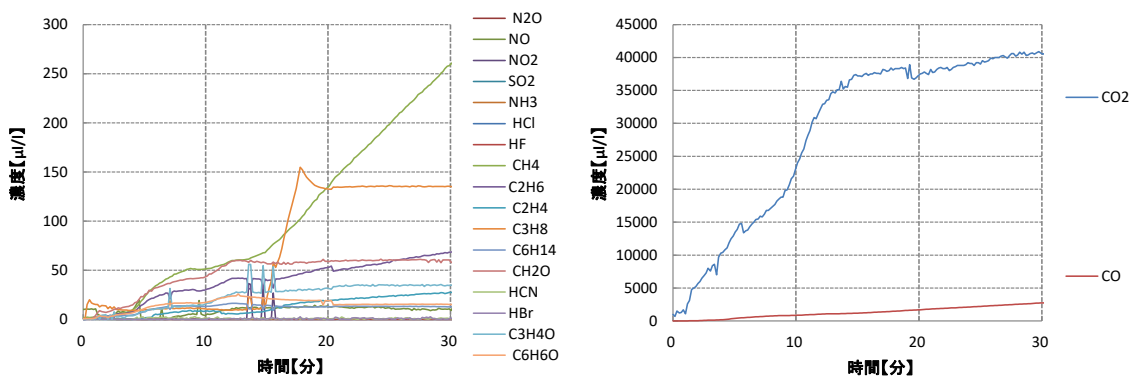


図 5.2.1 木材のガス成分分析結果

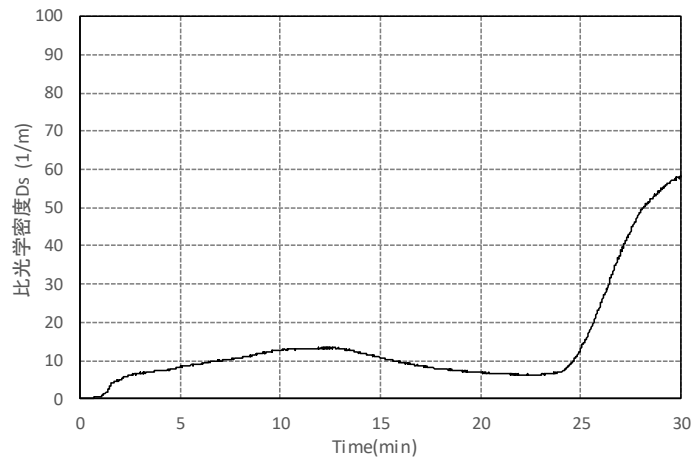


図 5.2.2 木材加熱時の比光学密度

ガス成分分析の結果から刺激性影響を評価した X_{FEC} を求め、比光学密度 D_s から減光係数 C_s を求め、図 5.2.3 に減光係数と刺激性影響の関係を示す。図 5.2.3 から、減光係数と X_{FEC} は比例関係にあり、近似曲線を求めると、 $y=0.7805x-0.096$ となった。

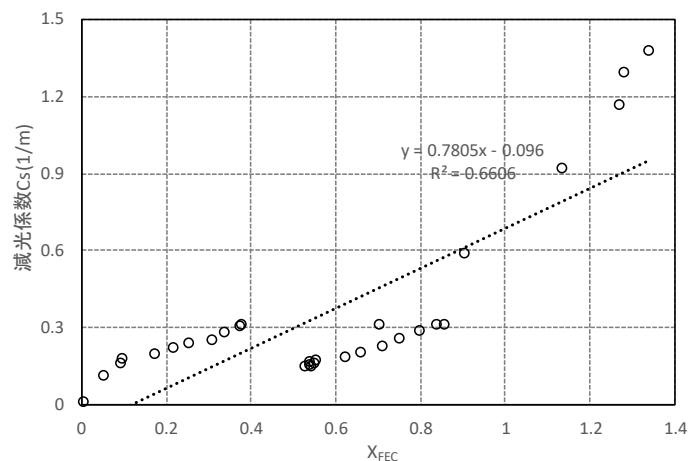


図 5.2.3 減光係数と X_{FEC} の関係

減光係数と X_{FEC} の比例曲線から減光係数に対する X_{FEC} を求め、歩行速度と X_{FEC} および 3.7 節で求めた回転速度と X_{FEC} を比較し、図 5.2.4 に示す。また、煙降下する前の歩行速度も図 5.2.4 に示す。刺激性煙の影響を受けた避難者の歩行速度は X_{FEC} と比例関係にあり、 X_{FEC} は 1.0 になった時を許容限界とし、火災から避難するため自分で有効な行動が取れなくなると考えた場合、煙が降下するよりも前の歩行速度は $y=-1.3x+1.3$ で求めることが可能である。1.3m/sec は現行する避難安全検証法において、建物になれた特定の人の歩行速度である。他の用途および階段部分については、平常時の歩行速度に応じて求めることが可能である。

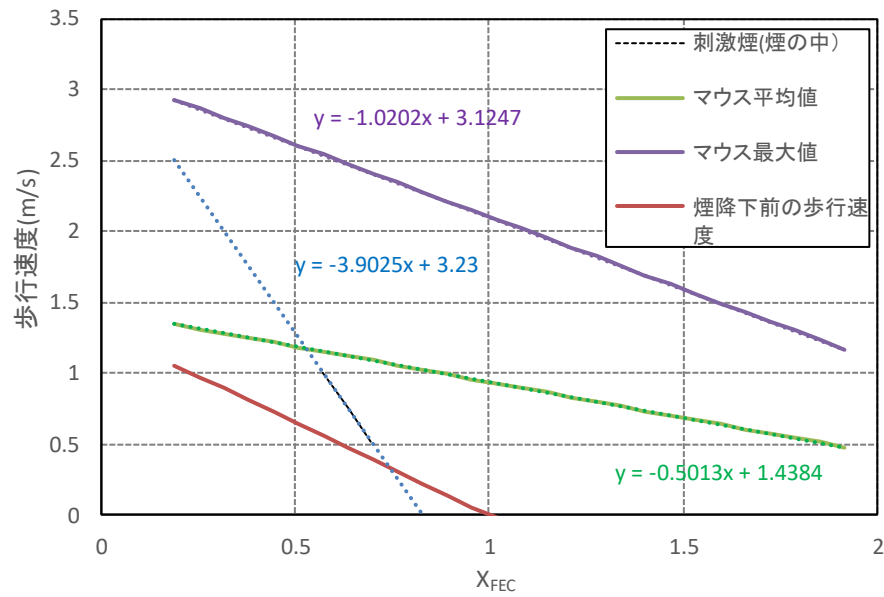


図 5.2.4 歩行速度・回転速度と X_{FEC} の関係

図 5.2.4 から、煙の中において、 $X_{FEC}=0.82$ で許容限界となることがわかる。また、煙中におけるマウスの回転速度と人間の歩行速度の関係性を求め、式 5.2.1 に示す。

$$\frac{3.23-3.9x}{1.4-0.5x} (\text{マウスの回転速度}) \leq \text{歩行速度} \leq \frac{3.12-1.02x}{3.12-1.02x} (\text{マウスの回転速度}) \cdots \text{式 5.2.1}$$

式 5.2.1 を用いて、マウスの挙動から人間の歩行速度を求めることが可能となる。

5.3 避難安全設計の検証例

5.3.1 対象建築物⁵⁾

建物は耐火づくりの二階建てのコンクリート造の住居用建物とし、火災室は一階の一室に合成系収納物を配置し、燃焼実験を行った。対象建物の平面図および室内レイアウトを図 5.3.1 と図 5.3.2 に示し、可燃収納物の詳細を図 5.3.3 に示す。

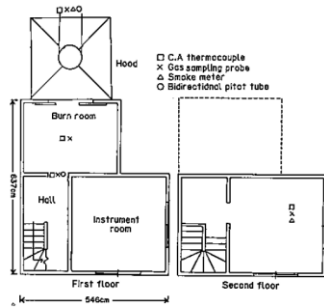


図 5.3.1 建物平面図

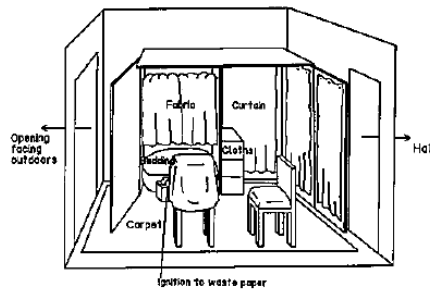


図 5.3.2 室内レイアウト

2) Synthetic and natural polymers		
Polyacrylonitril	4 kg	N-containing materials (9kg)
Flexible urethane foam	1 kg	
Rigid urethane foam	3 kg	N-containing materials (9kg)
Nylon-6	1 kg	
Polyester	8 kg	N-containing materials (9kg)
Polyethylene	1 kg	
Polypropylene	1 kg	N-containing materials (9kg)
Wood	9 kg	
Plywood	51 kg	N-containing materials (9kg)
Paper	2 kg	
Total	81 kg (synthetic 23%)	

図 5.3.3 可燃収納物の詳細

1 階は 2 室（6 畳および 8 畳）とホールからなり、2 階は 1 室（8 畳）とホールからなる。1 階と 2 階のホールは階段部分を含む。火災室は面積 9.7m²、高さ 2.5m のもので、外部に対して 195cm×170cm の開口とホールに対して 195cm×80cm の出入り口を有するものとする。内部はセラミックウールブランケットの被覆を施し加熱実験を行っている。1 階の他の一室は測定室として用い、火災室及びホールからは完全に隔離されたものである。実験のために建てられた建物であるため、出口は火災室にのみ設けられていたが、避難設計上、1 階の階段登り口の横を出口があるものとし、避難安全検証の避難必要時間については、出口に至るまでの時間とした。

積載可燃物量(MJ/m²)の計算を表 5.3.1 に示す。発熱量は既往文献⁶⁾⁷⁾⁸⁾を参照した。積載可燃物量は 173 MJ/m²とした。

測定は火災室および 2 階の寝室でそれぞれ CO、CO₂、HCN、NO_x、SO_x の濃度がガスクロマトグラフィーおよびイオンクロマトグラフィーによって測定された。

表 3.5.1 火災室の積載可燃物量

燃焼可燃物	質量(kg)	発熱量(MJ/kg)	発熱量(MJ)
ポリアクリロニトリル	4	29.2	116.8
ウレタンフォーム	4	29.3	117.2
ナイロン6	1	27.4	27.4
ポリエステル	8	21.8	174.4
ポリエチレン	1	46.64	46.64
ポリプロピレン	1	50.24	50.24
木	9	18.9	170.1
合板	51	18.84	960.84
紙	2	10.1	20.2
合計発熱量(MJ)	-	-	1683.82
積載可燃物量(MJ/m ²)	-	-	173.58969

5.3.2 既往手法による避難安全検証⁹⁾

避難安全検証法に従い、全館避難安全の検証を行った。全館避難安全検証は居室避難安全検証、階避難安全検証、全館避難安全検証を行うものである。ここでは居室避難安全検証と階避難安全検証の記述を省略し、全館避難安全検証のみを示す。

煙の降下時間は火災室→2 階寝室→階段→廊下の順番を想定し、検証を行った。内装材料は不燃材料とし、排煙設備は火災室が自然排煙、他の部分は蓄煙とした。

①階避難所要時間の算出

第一（階避難開始時間）

			2階
当該階各室床面積	A_{floor}	m ²	12.9
当該階床面積	A_{floor}	m ²	16.15
避難開始時間	t_{start}	min	5.535828

第二（地上までの歩行時間）

			2 階	階段
最大歩行距離	l_1	m	7.675	5.46
歩行速度	v	m/min	78	36
歩行時間	t_{travel}	min	0.098397	0.151667

歩行時間合計	t_{travel}	min	0.261731
--------	---------------------	-----	----------

第三（出口通過所要時間）

在館者密度	p	人/ m^2	0.06	0.06
在館者人数	$\sum pA_{\text{area}}$	人/ m^2	0.774	0.774
有効流動係数	N_{eff}	人/min・ m^2	90	90
有効出口幅	B_{eff}	m	0.8	0.91
出口通過所要時間	t_{queue}	min	0.01075	0.009451

②全館煙降下時間の算出

火災室→寝室2階→ホール→1 階廊

第八（煙降下時間）

火災室煙降下時間

			火災室	測定室
当該居室床面積	A_{room}	m^2	9.7	12.9
居室平均天井高さ	H_{room}	m^2	2.5	2.5
煙等発生量	V_s	m^3/min	36.2518	3.12
有効排煙量	V_e	m^3/min	0	0
煙降下時間	t_{s1}	min	0.187301	2.894231

廊下煙降下時間

			廊下	廊下
開口面積	A_{op}	m^2	0	0
煙等発生量	V_s	m^3/min	36.2518	36.2518
限界煙層高さ	H_{lim}	m	1.9	1.9
廊下床面積	A_{corridor}	m^2	6.5	6.5
廊下天井高	H_{corridor}	m	3.75	3.75
有効排煙量	V_e	m^3/min	0	0
廊下煙降下時間	t_{s2}	min	0.331708	0.331708

③煙降下時間の算出2階

居室煙降下時間

			寝室2階
当該居室床面積	A_{room}	m^2	12.9
居室平均天井高さ	H_{room}	m^2	2.5
煙等発生量	V_s	m^3/min	3.12
有効排煙量	V_e	m^3/min	0
煙降下時間	t_{s1}	min	2.894231

廊下煙降下時間

			廊下
開口面積	A_{op}	m^2	0
煙等発生量	V_s	m^3/min	36.2518
限界煙層高さ	H_{lim}	m	1.9
廊下床面積	A_{corridor}	m^2	6.5
廊下天井高	H_{corridor}	m	3.75
有効排煙量	V_e	m^3/min	0
廊下煙降下時間	T_{s2}	min	0.331708

ホール煙降下時間

開口面積	A_{op}	m^2	1.625
煙等発生量	V_s	m^3/min	0.325
ホール面積	A_{corridor}	m^2	6.5
ホール天井高	H_{corridor}	m	2.5
限界煙層高さ	H_{lim}	m	1.8
有効排煙量	V_e	m^3/min	0
煙降下時間	t_{s3}	min	3.5

階煙降下時間

全館階煙降下時間	$t_{s1} + t_{s2}$	min	7.244947

判定

火災室→寝室2階→ホール→1階廊下

階避難所要時間	$t_{\text{start}} + t_{\text{travel}} + t_{\text{queue}}$	min	5.806092
全館階煙降下時間	$t_{s1} + t_{s2}$	min	7.244947
判定			OK

5.3.3 有害性ガスの影響を考慮した避難安全検証

燃焼実験の有害性ガス測定値を使い、有害性ガスの影響を考慮した避難安全検証を行った。ガスの分布については、測定結果の関係上⁵⁾、1 階および 2 階をそれぞれ火災室および 2 階寝室と同じ均一な濃度と見なし、計算を行った。

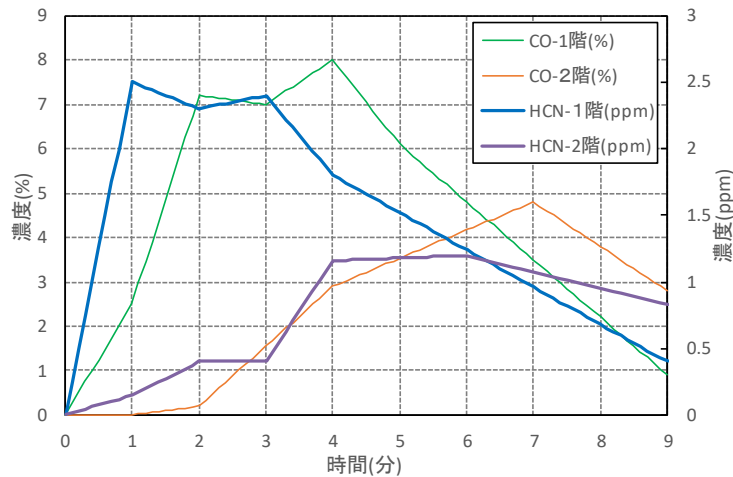


図 5.3.4 対象建物の時間と有害性ガス濃度の関係

有害性ガスの濃度から X_{FED} および X_{FEC} の計算を行い、図 5.4.4 に示す。刺激性ガスについては、1 階の火災室では高温のため、ほとんど測定されず、2 階の空間のみについて検討を行った⁵⁾。 X_{FED} および X_{FEC} が閾値 1.0 になった瞬間に避難行動が難しいとして計算を行った¹⁾。

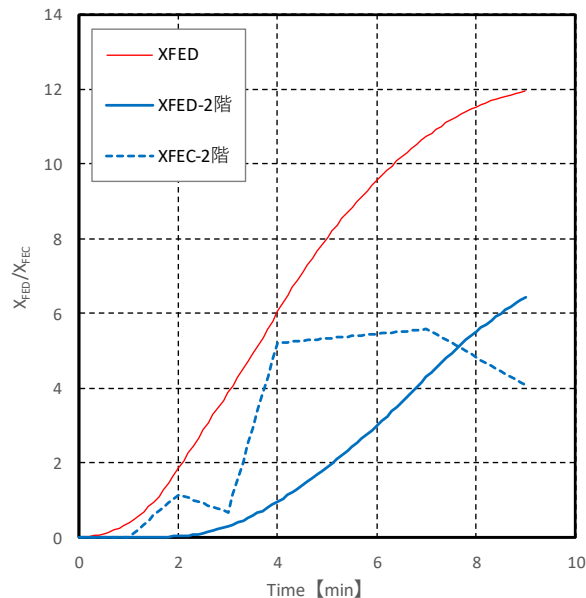


図 5.3.5 対象建物の時間と X_{FED} および X_{FED} の関係

避難ルートは、2 階の寝室にいる避難者が 1 階出口至るまでとした。避難開始時間について、火災室以外では、 $X_{FEC} > 0.1$ になる時間を知覚する時間として検証を行った。歩行速度は図 5.4.2 から X_{FEC} に従って計算を行った。許容避難時間については、煙降下時間を考慮せ

ず、 X_{FED} が 1.0 になる時間のみを考慮した。ガス有害性試験の影響を考慮した避難安全検証を以下に示す。有害性ガスの影響を考慮した部分を赤字で表記する。

①階避難所要時間の算出

第一（階避難開始時間）

			2階
当該階各室床面積	Afloor	m ²	12.9
当該階床面積	Afloor	m ²	16.15
避難開始時間	tstart	min	1.1

第二（地上までの歩行時間）			2 階	階段
最大歩行距離	l1	m	7.675	5.46
歩行速度	v	m/min	X_{FEC} の影響から算出	
歩行時間	ttravel	min	0.14	0.26

歩行時間合計	ttravel	min	0.4
--------	---------	-----	-----

第三(出口通過所要時間)

在館者密度	p	人/m ²	0.06	0.06
在館者人数	ΣpA_{area}	人/m ²	0.774	0.774
有効流動係数	Neff	人/min・m	90	90
有効出口幅	Beff	m	0.8	0.91
出口通過所要時間	tqueue	min	0.01075	0.009451

②全館煙降下時間の算出

火災室→寝室3→ホール→1 階廊下

第八（煙降下時間）

火災室煙降下時間

			寝室1	寝室2
当該居室床面積	Aroom	m ²	9.7	12.9
居室平均天井高さ	Hroom	m	2.5	2.5
煙等発生量	Vs	m ³ /min	36.2518	3.12
有効排煙量	Ve	m ³ /min	0	0
煙降下時間	ts1	min	0.187301	2.894231

廊下煙降下時間

			廊下	廊下
開口面積	Aop	m ²	0	0
煙等発生量	Vs	m ³ /min	36.2518	36.2518
限界煙層高さ	Hlim	m	1.7	1.7
廊下床面積	Acorridor	m ²	6.5	6.5
廊下天井高	Hcorridor	m	3.75	3.75
有効排煙量	Ve	m ³ /min	0	0
廊下煙降下時間	Ts2	min	0.367568	0.367568

③煙降下時間の算出2階

居室煙降下時間

			寝室3
当該居室床面積	Aroom	m ²	12.9
居室平均天井高さ	Hroom	m ²	2.5
煙等発生量	Vs	m ³ /min	3.12
有効排煙量	Ve	m ³ /min	0
煙降下時間	ts	min	2.894231

廊下煙降下時間

			廊下
開口面積	Aop	m ²	0
煙等発生量	Vs	m ³ /min	36.2518
限界煙層高さ	Hlim	m	1.7
廊下床面積	Acorridor	m ²	6.5
廊下天井高	Hcorridor	m	3.75
有効排煙量	Ve	m ³ /min	0
廊下煙降下時間	Ts2	min	0.367568

ホール煙降下時間

開口面積	Aop	m ²	1.625
煙等発生量	Vs	m ³ /min	0.325
ホール面積	Acorridor	m ²	6.5
ホール天井高	Hcorridor	m	2.5
限界煙層高さ	Him	m	1.8
有効排煙量	Ve	m ³ /min	0
煙降下時間	ts3	min	3.5

階煙降下時間

			全館	2階
階煙降下時間	ts1+ts2	min	7.316668	-
X _{FED} が1.0になる時間		min	1.6	3.1
避難許容時間		min	1.6	

判定

火災室→寝室3→ホール→1階廊下

			全館
許容避難時間	t _{limit}	min	1.520201
避難所要時間	t _{escape}	min	1.6
判定			OK

有害性ガスの影響を考慮した避難安全検証については、有害性ガスが煙よりも早く拡散するため、従来の避難開始時間の考え方をを用いた場合、不合格になる。刺激性ガスの影響を評価した X_{FED} の値から知覚時間を用いたが、避難者が火事と認識する X_{FED} の値については検証が必要である。また、一酸化炭素は無味無臭であり、気付かれにくいため、刺激性ガスが少なく、窒息性ガスが多く生成した場合、避難開始時間が遅れ、避難者にとってかなり危険な状態となる。

また、ガスの濃度分布について、CFD 解析を使って建築物全体の濃度分布を計算し、検証を行うことでより正確な避難安全検証が可能となる¹⁰⁾。

既往の安全検証法と比較すると、本ケーススタディーでは煙層が降下する時間よりも許容避難時間が短く、窒息性ガスの影響から許容避難時間が短くなり、歩行速度の低下から避難所要時間が長くなり、より厳しい基準であると考えられる。しかし、有害性ガスの影響を考慮することにより、避難開始時間が短くなることや、刺激性の少ない煙の中では煙が降下した後においても歩行が可能な場合があるため、より柔軟に避難安全検証を行うこ

とが可能となり、毒性の低い建築材料を用いることで小規模な住宅建築でも避難安全検証に合格することが可能となる。

5.4 まとめ・今後の課題

有害性ガスの影響を考慮した避難安全性の評価手法を提案し、有害性ガスの窒息性影響、刺激的影響から避難安全検証を行うことを検討した。

刺激性ガスがマウスの回転速度に与える影響を調べ、刺激煙の中におけるマウスの回転速度と比較することにより、人間とマウスの刺激煙から受ける影響について示した。

有害性ガスが避難者の歩行速度に与える影響について、煙降下前を X_{FEC} 、煙降下後を既往文献より求め、火災時の歩行速度低下を受けた避難所要時間を求めた。

避難安全検証について、現行手法と提案手法でケーススタディーを行い、比較を行った。提案手法は避難開始時間が短くなり、煙降下時間以降も評価することが可能であり、より柔軟な避難安全設計が可能である。しかし、小規模な建物や毒性の高い燃焼可燃物に対して、煙降下時間より前に避難限界に達するため、現行手法よりも厳しいものである。

今後は、避難開始時間と X_{FEC} の関係を詳しく調べる必要がある。

ケーススタディーで用いた有害性ガス濃度分布は、測定値を使ったものであり、空間分布を均一と仮定したときのものである。4章の結果を用いた CFD 解析で濃度分布をより正確に求め、検証を行う予定である。

ケーススタディーでは、毒性の強い合成系収納物を燃焼した小規模の建物について検証を行ったため、煙降下時間より前に避難限界に達したものであったが、煙降下後の避難安全検証を今後行う予定である。

参考文献

- 1)日本火災学会: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,平成 19 年 2 月
- 2)日本建築センター： 新・防災計画指針—建物の防火・避難計画の解説書, 日本建築センター, 1995
- 3)神 忠久: 煙の中での歩行速度について,火災, Vol.25 No.2, 1975
- 4)ISO5659-1994 発煙性試験方法,プラスチック発煙
- 5)守川時生, 箭内英治, 渡辺貞一, 岡田健夫, 佐藤喜宣: 実建物火災実験における天然系および合成系収納物からの有毒ガスについて, Bulletin of Japan Association for Fire Science and Engineering, Vol38, No.2, 1989
- 6)日本火災学会編: 火災便覧 第 3 版, 理化書院, 1997
- 7) ポリウレタン工業協会 ホームページ ポリウレタンのリサイクル
- 8) 日本ポリケム株式会社 ホームページ
- 9)日本交通省住宅局建築指導課ら:2001 年版避難安全検証法の解説及び計算例とその解説, 株式会社井上書院, 平成 13 年 3 月
- 10)Beom Jin Jeong: Combination of CFD and Evacuation models for determination of FED and FEC levels, Repoet 5454, Lund 2014

第6章 まとめと今後の課題

6.1 まとめ

本研究では、二つの目的に対して詳しく調べた。一つ目は、ガス成分分析を用いたガス有害性試験の代替手法の提案、二つ目は有害性ガスの影響を考慮した避難安全設計手法の構築である。

ガス有害性試験の代替手法について、3章で詳しく説明を行った。ガス有害性試験の現行する基準値はマウスの行動停止時間によって評価を行っているが、ガス成分分析の結果を基準値にするために、ガス成分分析を行いながら現行のガス有害性試験を行い、有害性ガスの濃度および種類とマウスの行動停止時間の関係を調べた。ガス成分分析の結果から、毒性値 L_{FED} の計算を行い、マウスの挙動との比例関係を確かめ、95%信頼区間を求めることにより、 L_{FED} 値からマウスを用いずに行うガス有害性試験が可能である区間の基準値を得た。妥当性を確かめるため、他のガス有害性試験装置によって行われた実験結果に対しても当てはめたが、同様の結果を得ることができた。樹脂や壁紙を中心とした試験体のマウスを使ったガス有害性試験の削減手法を提案することができた。

有害性ガスの影響を考慮した避難安全設計手法について、4章で火災時における条件と燃焼生成物について調べ、5章で避難安全設計手法の構築を行った。

避難安全設計法に対し、1章に示したフロー図 2.1.2 について、既往文献および本研究で明らかになったことを図 6.1.1 に示す。

図 6.1.1 において、本研究で対応している部分について、各章および節で示した。

4章では、火災時における有害性ガスの濃度分布を調べるために、区画火災を火災進展段階に分け、それぞれの燃焼条件に対して、チューブ炉試験を行い、燃焼条件と燃焼生成物の関係を調べた。得られた関係を CFD 解析に用いることで、有害性ガスの濃度分布を得ることが可能である。

また、簡略チューブ炉試験でも同じ加熱条件で実験を行い、ISO チューブ炉と比較をした結果、加熱条件を両チューブ炉で合わせることが可能であり、一致した燃焼条件で実験を行うことは可能である結果が得られた。

5章では、有害性ガスの影響に対して、刺激性ガスと窒息性ガスそれぞれが許容避難時間および避難所要時間に与える影響を評価した。刺激性影響および窒息性影響はそれぞれ X_{FED} および X_{FEC} を用いた。刺激性ガスが避難者に与える影響については、歩行速度のみを考慮し、煙降下時間前と後それぞれについて評価式を提示した。

また、二階建ての住宅に対して、現行手法および提案手法を使って避難安全検証を行い、比較することで、提案した手法について示した。

図 6.1.1 において、実火災と小規模試験の比較については、2.5.1 節に示した。火災進展段階、CO/CO₂、当量比が一致する場合、実火災と小規模試験は比較可能である。

ガス・煙の拡散速度および避難者位置におけるガス・煙濃度について、CFD 解析を本研

究では行えず、検証には実験値を用いたが、CFD 解析による毒性ガスのシミュレーション例は既往文献から確かめた。Beom による研究では、火災シナリオを決め、CFD 解析から温度、CO、HCN、CO₂などを出力値として得ることによって、XFEDとXFECの計算を行った。

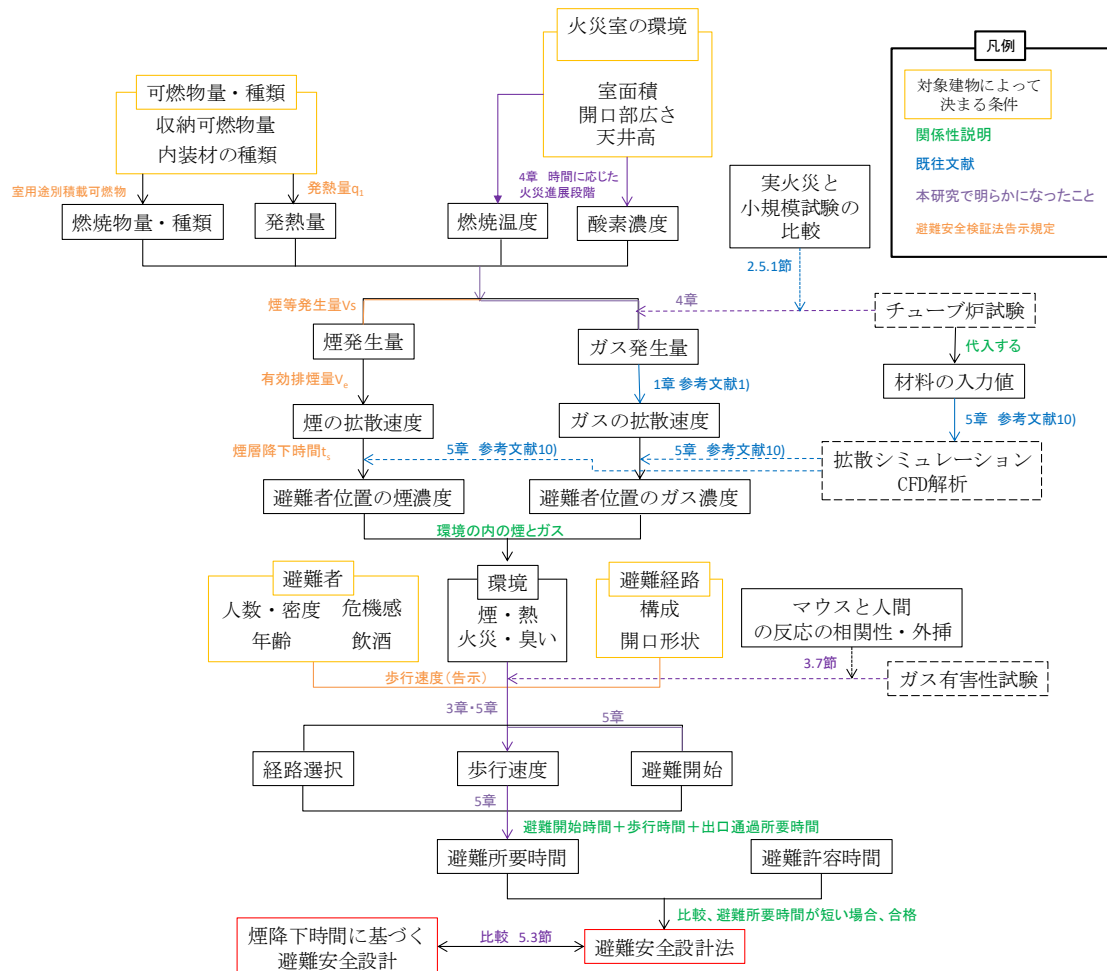


図 6.1.1 構築した避難安全設計法のフロー図

ガスの拡散速度については、小島による研究で煙とガスの拡散速度が実大規模の火災実験によって確かめられ、拡散速度は粒子密度に依存すること示された。

図 6.1.1 において、煙降下時間や歩行速度、燃焼物の発熱量、燃焼物量については、避難安全検証法告示規定に準じるものとした。

本研究では、有害性ガスが避難安全に与える影響について、現在の国内外の研究状況について調べ、有害性ガスが許容避難時間および歩行速度低下に与える影響を具体的に評価し、有害性ガスの影響を考慮した避難安全検証法を提案し、既往手法との優位性を示した。また、ガス有害性試験について、ガス成分分析の値を用いて基準値を定め、削減案を提出することができた。

6.2 今後の課題・展望

3章では、ガス有害性試験に対し、マウスの削減案を提案したが、木材やフォーム材等については依然マウスを使ったガス有害性試験を行う必要がある。削減できる範囲を広げる必要があり、木材やフォーム材について、行動停止時間と有害性ガスの関係を調べ、毒性値から行動停止時間を予測することによって、代替手法を考案する予定である。

4章では、材料の燃焼温度と生成ガスの濃度関係を求めるために、チューブ炉に対しFDSを行ったが、再現できなかった。輻射熱や試験体ボードの運行速度を考慮、解析モデルを改良する必要がある。また、燃焼条件が比較的簡単である簡略チューブ炉に対して、熱解析を行う予定です。

5章では、避難開始時間と X_{FEC} の関係を詳しく調べる必要がある。

また、4章の結果を用いたCFD解析で濃度分布をより正確に求め、検証を行う予定である。さらに、ケーススタディーでは、毒性の強い合成系収納物を燃焼した小規模の建物について検証を行ったため、煙降下時間より前に避難限界に達したものであったが、煙降下後の避難安全検証を今後行う予定である。

本研究では、動物実験に替わる成分分析に基づく代替手法案から、マウス使用数を減らし、ガス成分分析による有害性ガスの評価が可能となり、動物愛護の観点から動物実験を減らすことができた。また、毒性値を計算することにより、材料の危険性を具体的に評価することができ、建築設計において建築材料の選択の幅が広がり、より安全な住環境の実現が可能となる。

火災時に発生するガスの毒性の評価したことから、建物内にガス成分分析できるシステムを導入することで、火災時の館内危険レベルを区画ごとに調べ、館内者に知らせることができる。また、消防士が消防活動の際にFTIRに替わる簡易ガス成分分析装置を持ち込むことで、救助活動の安全性の向上が期待できる。

有害性ガスの影響を考慮した避難安全設計手法については、館内の有害性ガスの分布を求めることは、実務上現在まだ難しいと考えられるが、シミュレーション技術の向上により、将来より一般化することができる。煙降下時間ではなく、有害性ガスの影響を考慮して避難安全設計を行うことにより、避難開始時間が短くなることや、刺激性の少ない煙の中では煙が降下した後においても歩行が可能な場合があるため、より柔軟に避難安全検証を行うことが可能となり、毒性の低い建築材料を用いることで小規模な住宅建築でも避難安全検証に合格することが可能となる。住宅火災における死者数が多く、中でもガス中毒による死因が一番多い中、住宅に対して避難安全設計を行うことは多くの命を救う可能性があると考えている。

付録 1

ISO29903 異なった火災モデルとスケール間の毒性ガスの比較の手引き

序文

1. 範囲

本国際規格は実験的火災試験から発生する毒性ガスの測定される生成物を特徴づける法則を提示し、これらの異なる種類とスケールの火災試験の結果を比較する基本を示す。また、ガスの測定に不確かさがあることは考慮に含まれている。この結びついた不確かさは試験の結果を近似しているか、違っているのかを決める重要な鍵となる。

ベンチスケール試験と実規模試験の十分な一致は火災ハザードとリスク診断に必要な正確さに基づき、ISO 29903:2012 の範囲には含まれない。

本国際規格は異なる火災試験における測定からの毒性ガスの関連性と重要さを定義する。定義することで異なる大きさと種類の火災試験間でこのようなデータがどう比較されるのかについて一般的な規格を供給することが可能になる。

火災試験があらわす燃焼状態、試験や試験体の他の特性、火災生成物のサンプリング方法、毒性ガス種の分析手法が毒性ガスデータの重要性を定義する際に最も重要な要素である。

本国際規格は以下の項目に対する道具を提供するつもりである

- a) 火災試験から得られた毒性ガス結果の重要性と関連性の定義
- b) 異なったスケールと特徴の火災試験から得られた毒性ガスの比較
- c) 小規模試験から大規模試験の予測またその逆

本国際規格は主に ISO13571 に記されたガスのために作られた異なった規模の物理的火災モデル間の毒性ガスデータの比較に注意しながら、一般的な規格を示す。

2. 引用規格(省略)

3. 用語と定義(省略)

4. 燃焼状態

4. 1 一般

火災時のあらゆるスケールにおいて生成する成分は火災時の火災ステージの可燃物量、酸素量、雰囲気温度によって決まる。これらの状態は同時に材料の燃焼速度や放出速度 (effluent generation) を決める。ISO16312-1 を参照。

開発済みの製品の火災試験の間では、燃焼条件は変化することが多い。これらの変化は可燃物の化学性質や換気の十分さを含む。

分解が熱分解か燃焼分解かは毒性ガスの生成にとって支配的な要素である。

毒性ガスのデータが取れた燃焼状態は比較する火災モデルもしくは試験モデルに可能な

限り近づける必要がある。(条項 6 を参照)

NOTE1 大きな変化は放出した生成物の酸化物の割合に影響を与えるかもしれない。小さな変化は顕著な効果がないかもしれない。

NOTE2 火災ステージおよびそれと一致する燃焼状態は ISO19706 に記されている。

4. 2 熱環境

試験における熱の境界の条件は外部の流熱の影響とすべての加熱燃焼からの流熱を含む。

試験体が燃焼中に受ける熱環境はガス温度、試験体の材料の温度を含む。これらのものは熱の境界条件と定義される。

4. 3 換気

比較する物理的モデルの換気量は燃焼状態によって決定される。異なる方法を比較するためには類似度を評価するために換気状態の特徴が必要となる。

ある試験に対し、換気量がいかに決まるかを確認する必要がある、その原理が普遍的なものなのか、局地的なものなのかを考える必要がある。

気化燃料比率と流入酸素量と濃度がそれぞれコントロールされている物質的火災モデルに対して、有効酸素比 (relative oxygen availability) は燃料酸素等価比 (fuel/oxygen equivalence ratio) によって定義できる。実規模試験や他のモデルでは、一つもしくはどちらの項も未知の場合がある。そういったケースでは境界条件 (broader characterization) が使用される。これは普遍的な当量比であり、もしくは換気が不十分な燃焼 (underventilated burning) や換気が十分な燃焼 (well ventilated burning) みたいなものである。

NOTE1 物理的火災モデルの当量比の計算方法は ISO19703 で与えられている。

NOTE2 空気供給量が重要な要素になる試験もある。特にチューブ炉は空気供給速度が燃焼結果に影響を与えるので、顕著である。

4. 4 試験体の特性

製品となってる材料で単一で均質な材料からなるものの試験体が物理的火災モデルに使用される際には試験装置の制約に合わせて調整する必要がある。

均質じゃない製品からの試験体の場合、比較する試験両方が違う材料の似た部分を含む必要がある。

層になってる工業製品に対しては、試験体のレイヤー間の関係が保たれたままの物理的火災モデルが理想である。

NOTE 毒性ガスの収量は表面の曝露、時間と貫通範囲に依存することがある。

5. 毒性ガスデータ

5. 1 ガス種の確認

最低限のガス種は ISO13571 のリストに載ってるものについて考える必要がある。追加するガスが試験体や製品の化学成分から保証されたものとして認識しなければならない。

5. 2 毒性ガスデータの異なる表現

5. 2. 1 一般

この章では火災試験から得られたガスデータを表す特徴的な表現をまとめている。その表現が近似する他の試験との比較に適しているか、小さいスケールで実規模スケールの予測の規則的なものなのかを含む。

特定の火災モデルからのガス濃度のような精製（整理されてない）計測データから、高いレベルに整理されたデータ（e.g. 収量）にする際に、どの方法を取るか使用した物理的火災モデルによる。異なった火災モデルの特徴の関連情報は **Annex A** を参照。

データはスカラーもしくはベクトルの形で示すことができる。直接量の比較に適したタイプのデータもあるが、比較にモデルを必要とするものもある。下の **Table 1** に最も常用のものを示す。

5. 2. 2 収量

5. 2. 2. 1 生成した毒性ガスの質量 省略

5. 2. 2. 2 試験体の消費質量

試験体消費量の計測もしくは近似は毒性ガスの収量を計算するには必要である。

3つの方法中少なくとも一つの質量が計算されなければならない。

—試験体の残量の連続測定に基づく質量損失。

—試験体の残量の最終測定に基づく質量損失。

—重量分析の計測が可能でない場合、質量損失の評価は試験体の化学式および燃焼製品の炭素バランスを使う。

NOTE 残った試験体の化学組成が初めのものと異なる場合、3つ目の方法に関し顕著なエラーが出ることもある。このエラーは残った試験体の化学組成を特定することによって減らすことができる。

5. 2. 3 毒性物の濃度

サンプリングポイントにおいては、ガスの濃度を測定することによって希釈されることが考えられる。ガス濃度はその物理的火災モデルの特有のものであり、直接の比較に用いるべきではない。しかし、異なった物理的火災モデルにおいても、濃度比（relative concentration）が一致する場合には比較に使ってもよい。

例として、CO/CO₂濃度比は比較の原則として使用することができる。

5. 2. 4 個々の毒性ガスが FED（もしくは FEC）への影響 省略

5. 2. 5 致死毒性効能 省略

5. 2. 6 毒性生成量の総量

試験体から得た毒性の総量は特有の値であり、比較に適してない。ただし、試験体、試験体質量、質量減少が試験体表面に対して加重した場合はこの限りではない。

5. 2. 7 生成比 省略

5. 3 分析データの重要性

5. 3. 1 一般

毒性ガスを測定し、分析手法を確かめることはとても重要である。考慮すべき要素は以下のものである。

—データの分析

—応答時間

—分析手法の選択

—発生源の影響

選択に関しては、類似した毒性種は比較に含まなければならない。名称が NO_x か PAH かなのようなケースにおいて、総量として表現するときはとても重要である。

測定の発生源はエラーを引き起こし、分析手法によって妨げとなることがある。起こりうる発生源に対する評価は火の延焼として作成しなければならず、それは困難で変化しやすいものである。

5. 3. 2 検出の限界

もし一つの毒性種が比較対象のあらゆるスケールで定義されてなくて、LoD がどちらのスケールでも支配的な毒性を持つとしたら、その種に関連する比較の情報は LoD のみに基づく。すなわち、数の比較はそれほど重要ではない。

もし有効量の分数で表された関連する毒性ガスの結果の LoD 値が毒性ガス総量の結果に密接に関連しているため、ガスからの最大寄与は重要視すべきである。

5. 3. 3 測定の不確かさ (省略)

6. 異なる物理的火災モデルからの毒性ガスデータの比較・予測

6. 1 一般

5 節で求められた毒性ガスは 4 節で決めた類似した燃焼状態で比較されなければならない。異なるモデルの収量の比較には異なった法則の適用が可能である。すなわち、火災ステージ、CO/CO₂ 比、当量比。

毒性ガスの比較に方法論が必要となるかは、どの比較法が使われてるだけでなく、6.3.1 で述べたように比較が直接的なものなのか、間接的なものなのかによる。

一つの物理的火災モデルから得た毒性ガスのデータからもう一つの予測するに相当する方法論は 6. 4 に示す。

収量は推奨されている比較パラメーターである。

6. 2 比較法則

6. 2. 1 火災ステージ

物理的火災ステージによって予想された火災ステージは ISO19706 に従う必要がある。もし、試験体の燃焼が試験中に一つ以上の火災ステージを含むなら、そのそれぞれの火災ステージがある試験は必ず各ステージが毒性ガスの収量に与えた影響を決め

ている。e.g. 当量比

6. 2. 2 CO/CO₂ 比

CO/CO₂ 比は燃焼に対する酸素の能力を示しており、したがって色んな燃焼状況を表している。物理的火災モデルじゃら計測した CO/CO₂ 比は色んな状況で比較の基本として使用できる。

しかしこの法則はハロゲン族を含む材料には適してない。ハロゲンは燃焼過程に影響し、優勢な燃焼条件とは無関係な CO 産物を作り出すからだ。

実規模スケール試験において、燃焼温度および下層温度は毒性ガスの生成に影響するため、考慮しなければならない。

NOTE 1 ISO19706 は火災の異なるステージを CO/CO₂ 比を使って定義している。

CO/CO₂ 比は代わりに似たような答えの小さい小数点の数が使用されることを避けることができる。

NOTE 2 実規模試験では CO/CO₂ 比はサンプリング位置に大きく依存し、これは点火前のサンプリング位置であり、CO が CO₂ に酸化される反応によるものである。

6. 2. 3 当量比

燃料/空気の当量比は燃焼反応に可能な量を表し、CO₂ と H₂O に変わる完全燃焼に必要な正規組成と比較され、比較の基本として適切である。当量比は火災試験中に特別な装置を使って測定でき、もしくは試験体の重量減少と燃焼側の酸素流量から計算して求めることができる。

当量比の境界は物理的火災モデルで決めなければならない。試験の比較について、燃焼の局地的な当量比なのか全体の広い範囲での当量比なのかを決める必要がある。

大規模試験の燃焼温度と下層温度は毒性ガスの産出に影響を与えることがあり、これは考慮に入れなければならない。

NOTE 当量比の計算は ISO19703 に記述されている。

6. 3 比較手法論

6. 3. 1 一般

異なる試験データの比較はそれぞれのガスの収量である。収量はベンチスケールの物理的火災モデルを使った特定の火災ステージをシミュレートした状態下である材料の試験体を燃焼して決めるデータである。これらのデータは同じステージで異なる物理的火災モデルもしくは完成された製品の実規模試験から得た毒性ガスの収量と比較される。

毒性ガス関連の直接比較に適したデータに対し、異なったスケールの 2 つの試験で直接比較することができる。直接比較に適してないデータに関しては、間接な比較を可能にするモデルが必要となる。このようなモデルは希釈要素を含むかもしれない、比較のために元データを再計算する表面燃焼露出量の一般化もしくは他の方法のような要素を含む。

2つの異なった比較のケース、直接比較と間接比較については図1に示す。

比較の方法論は6.3.2-6.3.4で記述し、概要を図2に示す。

6. 3. 2

使用できるデータの最初の評価には2つの試験の燃焼状態の比較が必要であり、それは比較するガスの産出期間についてである。燃焼状態の比較が不可能なら、二つの試験の毒性ガスの結果を比較すべきではない。

燃焼状態が一度類似しているとわかれば、使用したサンプリングや分析技術に対する評価が作成される。サンプリングや分析方法に基づくデータ補正は付録Bのように作成されるべきである。

このようなタイプのデータが比較に適しているのは比較可能だと確認すべきである。また、比較の不確かさについて評価すべきである。有意義な比較は計測の不確かさが異なることはない。

6. 3. 3 データの比較

毒性ガスデータ（6. 2を参照）の比較法則を6. 3. 2で作られた評価に基づき、選択する。

間接的な比較にはデータに適切なスケーリングモデルを適用する。（Figure 1を参照）

6. 3. 4 契約時の評価

6. 4 一つの火災モデルから他のモデルのデータ予測

7. 参考文献（省略）

Annex A 物理的火災モデルの特徴

Annex B 有毒ガスデータにおけるサンプリングと分析の影響

Annex C 適用例 ISO19700 のベンチスケールデータと大規模試験データの比較

C.1 CO₂/CO 比を比較法則として比較

Stec らは ISO9705 ルーム試験を ISO/TS19700 ベンチスケール試験の毒性ガスの生成量（重量減少に基づく）を比較した。彼らは CO₂/CO 比を主な比較法則として用いた。さらに、計測した CO₂/CO と等価比の関係を説明した。量スケールの生成量データは直接比較が可能である。計測の不確かさの情報についてはここでは記されていない。

Stec らは安定した状態のチューブ炉が独立したステージの再現が可能であることを示し、ベンチスケールから得た毒性ガスデータは ISO ルーム試験から得られたデータと調べられた材料に対して普遍的な一致性を持つ。比較は CO₂、CO、HCN、NO_x、総炭化水素物量と煙微粒子を対象とした。試験体は PP、PE、PA 6, 6、PS、MDF、MDF-FR とした。

チューブ炉試験のために、生成量と等価比の関係のデータはすべての材料に対して入手した。一部の大規模試験の国際的等価比がすでに概算されている。ほかの試験は計算に必要なデータが不足している、代わりに、火災状態を CO₂/CO 比で特徴づけられている。これは全ての試験において可能である。ゆえに、生成量とデータとの比較は CO₂/CO 比との相関関係として表されている。

等価比の計算もしくはデータがある大規模試験に対し、等価比と CO₂/CO 比の比較が推奨されている。両者の比較を下に示す。図 C.1 は PA6,6 のルーム試験と安定した状態のチューブ炉試験の等価比と CO₂/CO 比の関係を示す。グラフは試験室の開口部の等価比と CO₂/CO 比、部屋から出た煙を集める煙ガスダクトのそれぞれプロットしている。図はさらに安定した状態のチューブ炉における等価比と CO₂/CO 比の関係を示している。これらの大規模試験では燃料は部屋の中のさらに入っており（プール火災）、質量損失は常に計測されている。

図 C.1 の比較から、ルーム開口部の計測の CO₂/CO 比（等価比が計測されている場所）と煙ダクトの CO₂/CO 比は異なることが分かる。この違いは、ドアが開かれた後 CO₂ の構成を示し、ダクトの計測からの CO₂/CO 比のより高い値を引く起こすことを示す。これは、この試験の換気が不十分な状態でより顕著になる。大規模試験の結果と安定した状態のチューブ炉間で違いはあるものの、一般的な関連性が確認でき、代表的な CO₂/CO 比で大規模試験の状態をチューブ炉が再現できることを示す。

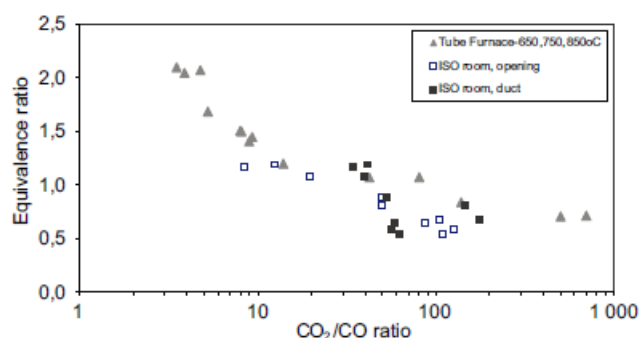


Figure C.1 — Relationship between equivalence ratio and CO_2/CO ratio for test with PA 6.6

図 C.2 は MDF の試験結果を示している。MDF は表面被覆材として大規模試験中に台紙に張られ、そしてそこには直接的な重量減少データがなかった。チューブ炉と大規模試験では大きく差が出た。この差は CO_2/CO 比の計測の違いによるものなのか、大規模試験の等価比の概算によるものなのかは明らかではない。

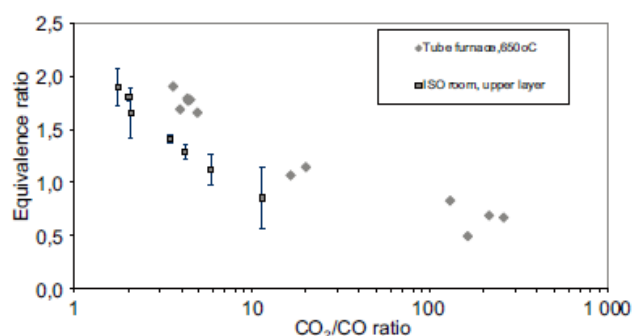
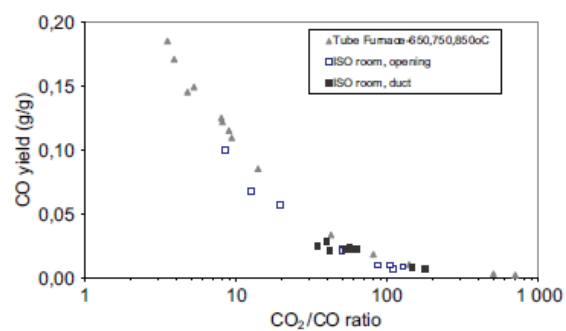


Figure C.2 — Relationship between equivalence ratio and CO_2/CO ratio for test with MDF

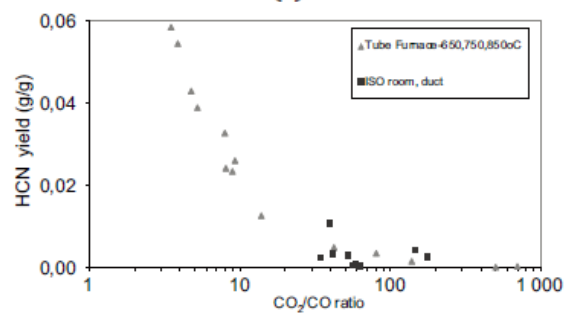
最も大規模と小規模の一致に近いとプール火災で報告されたのは、PP と PA6,6 の生成量である。材料が表面被覆材として燃え、部屋の異なる場所で様々な分解状態で燃え、プロパンのバーナーも燃えているため、チューブとの直接的な比較は最も難しい。にもかかわらず、MDF、MDF-FR と PS は異なるスケール間で CO 、 CO_2 、HCN、炭化水素生成量の信頼できる一致を見せた。

下に比較から作成したいくつかの例を示す。図 C.3 は PA6,6 の CO と HCN の比較を示している。MDF ボードの比較を図 C.4 に示す。

2 つのスケール間からのデータの計測の不確かさについての情報は無い。そして、ここで示す比較は半定量的として認識すべきである。

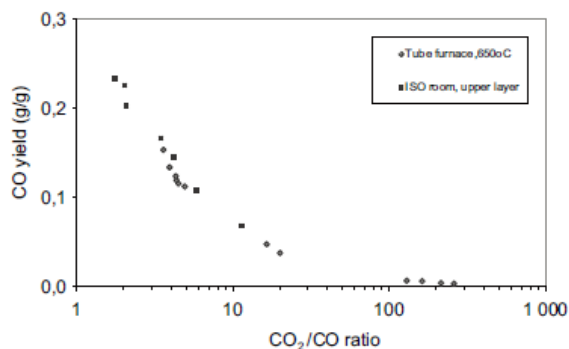


(a)

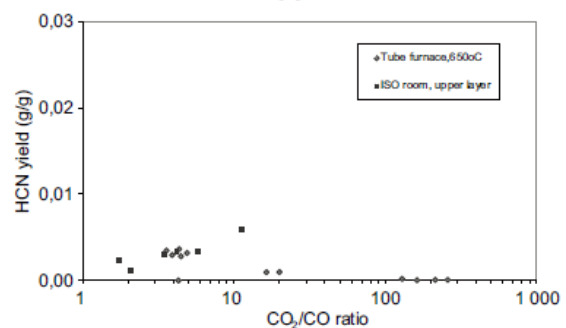


(b)

Figure C.3 — Comparison of (a) CO yields and (b) HCN yields, from tests with PA 6.6



(a)



(b)

Figure C.4 — Comparison of (a) CO yields and (b) HCN yields, from tests with MDF board

C.2 生成量比較に等価比を比較法則として使用した場合

Blomquist らは（質量損失に基づいた）毒性ガスの収量データをベンチスケール、大規模スケール、実規模スケール間で比較を行った。彼等は等価比を主な比較法則として用いた。燃焼条件について、換気が十分な状態から不十分な条件まで考察がなされた。すべてのスケールから生成量データがあったため、直接的な比較が可能であった。計測の不確かさの情報についてはここでは記されていない。

Blomquist らは大規模スケールの生成量を ISO19700 ベンチスケールの試験方法で再現する結果の妥当性について研究した。PA6,6 を使った一連のチューブ炉試験の実験が行われた。チューブ炉で使え有れた PA6,6 は以前大規模 enclosure 試験に使われたものと同じバッチで生産されたものである。主な大規模試験シリーズは ISO9705 ルーム試験を用いている。それは部屋開口部を制限することで、十分に換気されている状態と換気が不十分な状態の両方を作り出せるものである。追加された試験シリーズでは、囲いの大きさが大きくなり、燃料が保存用具の中に置かれ、実規模スケールの保存位置をシミュレートしている。どの試験シリーズにおいても、換気量の減少は pH メーターを使って測定されている。PA6,6 は前もって大規模プール火災試験を行っている。

主な有害ガスの測定は囲い試験の出口の排出部で行われ、FTIR が測定に使われた。CO₂ と CO は追加して希釈と攪拌されたスモークガスダクトの中で測定された。大規模スケールのオープンプール試験では、ガスサンプルは煙ガス収集システムのダクトから吸引されていた。FTIR はこれらの試験では使用されず、代わりに dedicated ガス分析を用いた wet-chemical 法が使用された。

PA6,6 の ISO19700 のチューブ炉から得られた生成量データは等価比を使って比較された。比較の一般的な結果作成は ISO19700 にとって好都合である。しかし、違ったスケールからのデータの測定の不確かさについて情報がないため、下に示す比較は半定量的として見るべきである。何種類かのガスに対してはベンチスケールの生成量データと大規模火災試験からのデータの間に強い関連性があった。HCN と NH₃ は 2 種類の囲い試験の開口部で計測されていた。これらのケースでは、チューブ炉データは一般的に十分に大規模スケールデータと関連している。（図 C.5 を参照）

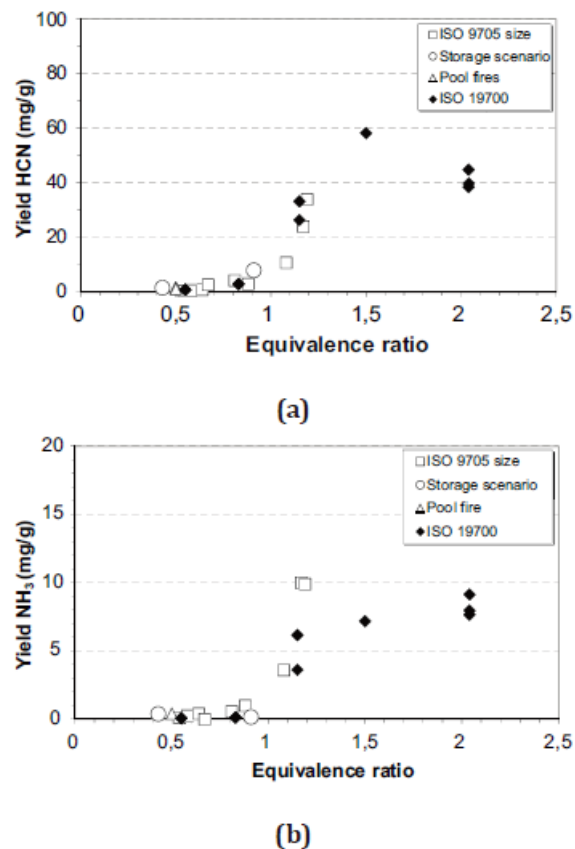
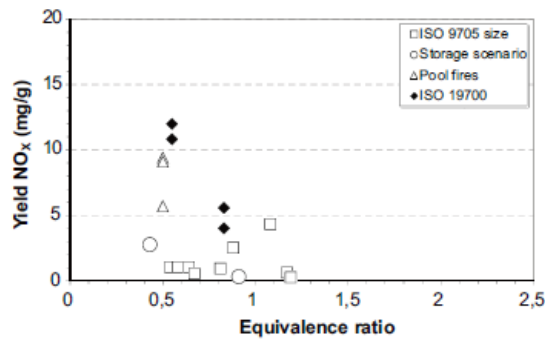


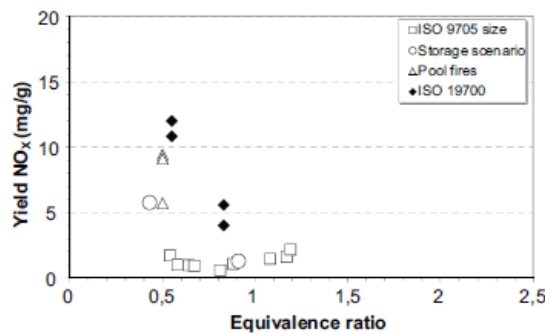
Figure C.5 — Comparison of ISO/TS 19700 yield data with large scale data (a) HCN (b) NH₃

チューブ炉から得た NO_x データは予測傾向で換気が十分な状態の時に最も高い生成量を示した。オープンプール試験との比較にも良い傾向を示した。囲い試験の開口部から得られたデータは散乱していて、はっきりとした傾向を示さなかった（図 C.6(a)を参照）。囲い試験のダクトからサンプリングした NO_x のデータはあまり散乱していなかったが、チューブ炉のデータと比較すると低い値を示した（図 C.6(b)）を参照）。囲い試験の開口部とダクト部における NO_x 生成量の違いの理由について、気相が2つの計測位置の間のルーム外で反応していることが考えられる。

チューブ炉試験からの組織的に高い生成量と囲い試験の生成量の測定の比較についての明白な説明はない。これは、小規模物理的火災モデル（チューブ炉）による結果もしくは比較する試験で使われる異なった分析手法によるものである。さらに、放出の進行時間の違いや現実での濃度の違い、そして損失濃度の違いや他の要素が原因である。しかし、オープンプール火災の結果と ISO9705 サイズの囲い試験の結果の違いは、オープンプール試験とチューブ炉試験の間よりも顕著である。



(a)

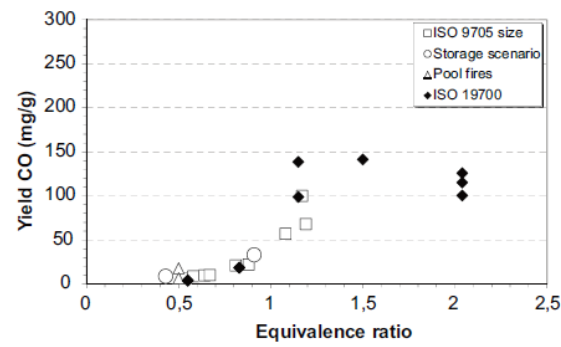


(b)

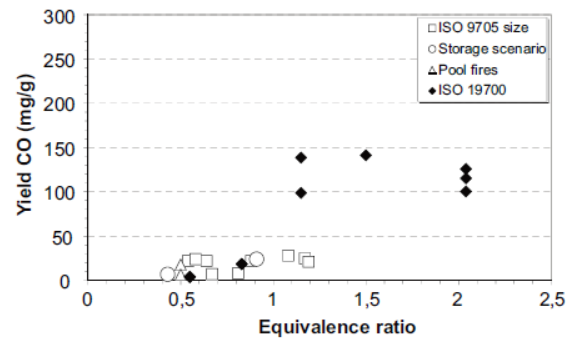
Figure C.6 — Comparison of ISO/TS 19700 yield data with large scale data (a) NO_x sampled in opening in enclosure tests (b) NO_x sampled in duct in enclosure tests

CO について、チューブ炉のデータは囲い試験（図 C.7a）の開口部のデータとよく一致している。CO₂ については、もっとも相関性の高いデータは囲い試験のダクトから測定したものである。（C.8b）ISO9705 囲い試験の開口部の CO₂ データは、等価比の増加に伴い、生成量が減少する傾向を見せなかったが、ダクトから計測したデータはその傾向を示した。

囲い試験の開口部とダクト（CO データ図 C.7， CO₂ データ図 C.8）の生成量の違いは NO_x で上に記した通りと考えられる。これは大規模スケール試験で代表的な測定をするという大きな挑戦であり、大規模試験においての結果をサンプリング箇所での実際の結果に結びつける必要性を例示している。

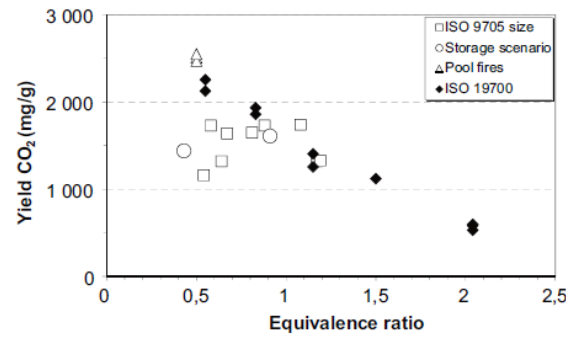


(a)

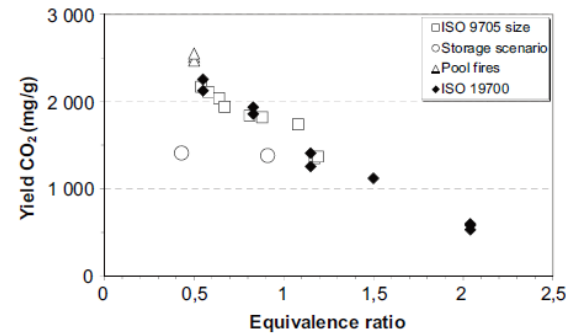


(b)

Figure C.7 — Comparison of ISO/TS 19700 yield data with large scale data (a) CO sampled in opening in enclosure tests (b) CO sampled in duct in enclosure tests



(a)



(b)

Figure C.8 — Comparison of ISO/TS 19700 yield data with large scale data (a) CO₂ sampled in opening in enclosure tests (b) CO₂ sampled in duct in enclosure tests

付録 2

ロータリーエンコーダー・プログラム

ロータリーエンコーダーのデータを取り込む時のプログラムを以下に示す。

```
#include <TimerOne.h>
#include <MsTimer2.h>

// A 相ピン割り当て
#define ENC_A 2
// B 相ピン割り当て
#define ENC_B 4
// A 相ピン 2 割り当て
#define ENC_C 5
// B 相ピン 2 割り当て
#define ENC_D 7

// 前回値 (Bit1:A 相、Bit0:B 相)
volatile int oldEnc;
volatile int oldEnca;

// エンコーダ値
volatile int encValue;
volatile int encValuea;

void doEncoderCounter(void){
    int newEnc = (digitalRead(ENC_A)?0:2) | (digitalRead(ENC_B)?0:1);

    if (0) {
        // do nothing
    } else if (0 == oldEnc) {
        if (2 == newEnc) { // up
            encValue++;
        } else if (1 == newEnc) { // down
            encValue--;
        }
    } else if (1 == oldEnc) {
        if (0 == newEnc) { // up
            encValue++;
        } else if (3 == newEnc) { // down
            encValue--;
        }
    } else if (2 == oldEnc) {
        if (3 == newEnc) { // up
            encValue++;
        } else if (0 == newEnc) { // down
            encValue--;
        }
    } else if (3 == oldEnc) {
        if (1 == newEnc) { // up
            encValue++;
        } else if (2 == newEnc) { // down
            encValue--;
        }
    }
}
```

```

    }
}
oldEnc = newEnc;
}

void doEncoderCounter(void){
    int newEnca = (digitalRead(ENC_C)?0:2) | (digitalRead(ENC_D)?0:1);

    if (0) {
        // do nothing
    } else if (0 == oldEnca) {
        if (2 == newEnca) { // up
            encValuea++;
        } else if (1 == newEnca) { // down
            encValuea--;
        }
    } else if (1 == oldEnca) {
        if (0 == newEnca) { // up
            encValuea++;
        } else if (3 == newEnca) { // down
            encValuea--;
        }
    } else if (2 == oldEnca) {
        if (3 == newEnca) { // up
            encValuea++;
        } else if (0 == newEnca) { // down
            encValuea--;
        }
    } else if (3 == oldEnca) {
        if (1 == newEnca) { // up
            encValuea++;
        } else if (2 == newEnca) { // down
            encValuea--;
        }
    }
    oldEnca = newEnca;
}

void setup() {
    pinMode(ENC_A, INPUT);
    pinMode(ENC_B, INPUT);
    encValue = 0;
    oldEnc = (digitalRead(ENC_A)?0:2) | (digitalRead(ENC_B)?0:1);

    pinMode(ENC_C, INPUT);
    pinMode(ENC_D, INPUT);
    encValuea = 0;
    oldEnca = (digitalRead(ENC_C)?0:2) | (digitalRead(ENC_D)?0:1);

    Timer1.initialize(1);
    Timer1.attachInterrupt(doEncoderCounter);

    MsTimer2::set(1, doEncoderCounter);
}

```

```
MsTimer2::start();  
  
  Serial.begin(9600);  
  
}  
  
void loop() {  
  
  Serial.print(encValue/4,DEC);  
  Serial.print("¥t");  
  Serial.println(encValuea/4,DEC);  
  delay(100);  
}
```

参考サイト : <http://www.ssi-robot.com/?p=628>

謝辞

本研究を審査していただきました野口貴文先生（東京大学工学系研究科教授、主査）、大宮喜文先生（東京理科大学理工学部教授、副査）、土橋律先生（東京大学工学系研究科教授、副査）、廣井悠先生（東京大学工学系研究科準教授、副査）、北垣亮馬先生（東京大学工学系研究科講師、副査）に心から深く感謝いたします。

本研究は、平成26年度住宅・建築物技術高度化事業（研究代表者：野口貴文、研究課題名:動物実験に替わる建築防火材料のガス有害性評価手法の技術開発）として実施されたものである。共同研究者である宇都宮大学の藤本郷史様には貴重なご意見をいただきました。また、本実験の実施において(株)東京システムバックの早川哲也様および(株)三菱樹脂株式の長谷善博様に多大なご協力をいただきました。諸関係者の方々に敬意を表し、御礼を深く申し上げます。

本研究は実験するのにあたり、LIXIL住生活財団 研究助成（研究代表者：藤本郷史、研究課題名: 建築材料の火災燃焼時のガス有害性評価手法の開発・標準化のための調査および各種試験評価法の実験的比較）の助成を受けたものである。諸関係者の方々に敬意を表し、御礼を深く申し上げます。

本研究を進めるに当たり、指導教官である東京大学大学院工学系研究科教授の野口貴文先生に研究および進路において、熱心なご指導・助言を賜りました。ここに心から厚く御礼を申し上げます。

本研究を進めるにあたり、国土技術政策総合研究所主任研究官の吉岡英樹様に国際的な交流・勉学の機会を数多く設けていただき、貴重なご指導・助言を賜りました。ここに心から厚く御礼を申し上げます。

本研究を進めるに当たり、東京大学大学院工学系研究科技術補佐員の棚池裕様に実験の実施を協力していただき、日々丁寧なご指導を賜りました。また、宇都宮大学の丸山徹様に実験の実施を協力をしていただきました。ここに御礼を申し上げます。

研究を続ける学生生活を送るに当たり、支援を下さった御両親、日々の指導をして下さった東京大学大学院工学系研究科講師の北垣亮馬先生、学部から指導して下さった千葉大学工学研究科教授の平島岳夫様、英語を指導して下さった東京大学大学院工学系研究科学術支援職員の安藤達夫様、楽しい時間を共に過ごして下さった田村様や研究室の皆様、趣味のボードゲームやリアル脱出ゲームで一緒に遊び戦って下さった友人達に、ここに感謝の意を申し上げます。