

45. 火災が環境に及ぼす影響評価 — 発生ガスと地球温暖化

QUANTITATIVE ASSESSMENT ON AWARENESS OF USER CONCERNING ENVIRONMENTAL RISK

奈良 松範*

Matsunori NARA*

ABSTRACT ; When a building and a forest are burned down by a fire, it generates a lot of gas of various kinds. Conventionally, in the area of research of a fire, the examination about the influence (toxicity) on which poisonous gas, such as carbon monoxide, carbon dioxide, hydrogen chloride, hydrogen cyanide, and two or more hydrocarbon, has the influence on the environment by fire combustion gas to a human body has been made. However, the air pollution by the gas which occurs from a fire can be said to have not thought at all about the environmental impact to global warming or ozone layer depletion from the first. So, in this research, in order to clarify relation between fire outbreak gas and global warming, it tried to perform prediction of the amount of generating of the gas which occurs from a fire, and impact evaluation to the earth environment by the simulation using the prediction result. Even when a building fire and a forests-and-fields fire were totaled from the result of analysis, it was shown that it is equal to about 120,000-person CO₂ emissions per year. Moreover, the importance of presuming these values by Monte Carlo simulation was shown.

KEYWORDS ; Fire , CO₂ emissions , Global Warming , Monte Carlo Simulation

1. はじめに

地球温暖化は社会的な注目を集めている大きな環境問題であることから、地球温暖化防止のための活動はグローバルな高まりを見せており、その成果も種々報告されている。しかし現状では、従来考えられていた対策のタイムスケジュールよりも遅れているように思われる。その理由の一つとして、温暖化ガスの発生源の多様化があるのではないかとと思われる。今後の地球温暖化対策を効果的に進めるためには、発生源の見直しも必要ではないだろうか。例えば、建物や森林が火災により焼失する場合、様々な種類の大量のガスを発生する。従来、火災の研究分野では、火災燃焼ガスによる環境への影響は、一酸化炭素、二酸化炭素、塩化水素、シアン化水素、および複数の炭化水素などの有毒ガスが人体へ及ぼす影響（毒性）についての研究が盛んになされてきている。しかしながら、火災から発生するガスによる大気汚染、さらに地球温暖化あるいはオゾン層破壊に対する環境影響については、ほとんど考えられてこなかったといっても過言ではない。もちろん、火災から発生するガス量が少ないことおよび火災規模もあまり大きくないことなどの理由から、大気汚染や地球環境への影響が十分に検討されてこなかったものと思われる。そこで本研究では、火災からの発生ガスと地球温暖化との関係を明らかにするために、火災で発生する二酸化炭素ガスの発生量予測およびその結果を用いたシミュレーションによる地球環境への影響評価を行うことを試みた。

2. 方法

火災の種別として、建物火災および林野火災を対象とした。建物火災においては、火災におけるCO₂の発生源として使用している木材の燃焼およびコンクリート中の炭酸カルシウム成分が加熱されることによる脱炭酸反応から発生する場合を考えた。建物構造は木造および非木造の2種類とし、木造建物火災では使用木材からは発生するCO₂量、非木造建物火災ではコンクリートから発生するCO₂量を対象とした。もちろん、木造建物に使用されている繊維や布などの有機材料からもCO₂が発生す

諏訪東京理科大学 Tokyo University of Science, Suwa

るが、これは含めない。また、非木造建物（RC 造、S 造、SRC 造、M造など）の構成材料をコンクリートで代表しているが、コンクリート以外にも木材をはじめとする有機材料が多く含まれているためCO₂が発生するが、本文ではこれら由来のCO₂発生も計算に含めない。したがって、実際の火災におけるCO₂発生量は本文で述べるより多いものと思われる。なお、コンクリートからの発生メカニズムは、炭酸カルシウムの脱炭酸反応（CaCO₃ → CaO + CO₂）が600℃～800℃の温度領域で生起することにより、化学反応論的にはCaCO₃の重量の44%がCO₂となるとした。

表1は火災によるCO₂発生量シミュレーションにおける推定値の一覧を示したものである。木造建物1棟あたりに含まれる

木材量は、単位面積あたりの木材使用量を0.22m³/m²（積算資料⁽⁵⁾）、平均延床面積を50坪（165m²）とすれば、36.62m³/棟となり、これを平均厚6cmの板材に換算して計算した。また、建物が全焼したとしてもこれらの木材がすべて燃えてしまうわけではないので、燃焼炭化深さを以下の式から計算した⁽¹⁾。

$$x = 1.24 (t - 4)^{1.152} \times e^{-0.0384(t - 4)}$$

ただし、x：炭化深さ、t：時間(h)、条件：標準火災温度曲線、ブゾンバーナ気流

木材が燃焼した場合に発生する熱分解生成ガスは、杉材の場合（加熱温度700℃、空気気流50および100L/hr

の条件）、平均1.485 CO₂ g/g⁽²⁾である。1年間に発生する火災（焼損）件数は火災統計⁽³⁾によれば、平成10年から13年までのデータの平均値を用いて火災件数から焼損棟数への換算（平均：1.4火災棟数/火災件数）を行った結果、21744棟とした。ここで、火災発生によりすべての建物が全焼してしまうわけではないので、火災の程度について補正を行った。これと同時に、火災被害額のデータより火災の程度に応じて被害の大きさを推定することにより、焼損度補正係数を定めた。年間火災棟数にこの係数を乗ずることにより、1年間あたりの正味の火災による木材完全燃焼量を推定した。非木造建物については、建築統計年報（国土交通省）⁽⁵⁾よりRC構造およびSRC構造の建築物の平均延べ床面積を求め、建物1棟あたりの火災によって加熱されるコンクリートの全表面積を推定した。ここで、平均区画面積（コンクリート壁で囲まれている区画）を144m²とし、壁の面積は床面積の1/2であるとした。ここまでに求められた被加熱コンクリート面積に加熱深さを乗ずることにより、加熱されるコンクリートの容積を算定した。また、加熱深さに該当する部分は、コンクリートの中性化が進行しているものとした。CO₂の発生源であるCaCO₃のコンクリート中の含有率は、コンクリート中のセメント量を標準的な295kg/m³とし、さらにセメント中のCaCO₃含有比を0.64とすることにより算定した⁽⁴⁾。化学反応式より求めたCaCO₃から発生するCO₂の量

表1. 火災によるCO₂発生量予測シミュレーションにおける推定値

種別	項目	値	備考
木造	W; 木材量(m ³ /棟)	36.6	50坪、2.22m ³ /10m ²
	d; 材平均厚さ(m)	0.06	木材量按分
	bw; 燃焼厚さ(m)	0.03	杉、松の20分平均値
	ρ; 木材比重	0.40	代表値
	G; 燃焼生成ガス(g/g)	1.49	杉700℃、気流100L/h
	α; 消損度補正係数	0.42	全焼:半焼:部分焼=0.239:0.086:0.674、同被害比=1:0.5:0.2
	Nw; 年間焼損棟数(棟/年)	21744	木造火災; 平均(H10～H13年)
非木造	A; 平均床面積(m ² /棟)	1298.0	建築統計(SRC+RC)
	a; 平均区画面積(m ² /区画・棟)	144.0	8m×16m(9区画)
	bn; 加熱厚さ(m)	0.02	中性化領域
	C; セメント中CaCO ₃ 含有比	0.64	コンクリ中セメント量295kg/m ³
	Gn; CO ₂ 発生比(kg/CaCO ₃ kg)	0.44	化学反応式より
	Nn; 年焼損棟数(棟/年)	25159	非木造; 平均(H10～H13年)
林野	Gf; 森林火災CO ₂ 発生量(ton-CO ₂ /ha)	72	アラスカでの実測データ
	Nf; 森林火災焼損面積(ha/年)	2321	林野焼損面積(H5年～14年)

表2. 感度シミュレーションのための分布推定

木造建物火災		非木造建物火災	
木材量(m ³); 三角		床面積(m ² /棟); 正規	
最小	22.0	平均	1298.00
尤度	36.6	標準偏差	129.80
最大	73.3	区画面積(m ²) 正規	
材厚さ(cm); 三角		平均	144.00
最小	5.0	標準偏差	14.40
尤度	6.0	加熱深さ(m); 三角	
最大	10.0	最小	0.01
燃焼厚さ(cm); 正規		尤度	0.02
平均	2.7	最大	0.04
標準偏差	0.3	CaCO ₃ 含有比; 三角	
生成ガス(g/g); 正規		最小	0.50
平均	1.5	尤度	0.64
標準偏差	0.1	最大	0.70
消損補正係数; 三角		CO ₂ 比(kg/kg); 正規	
最小	0.3	平均	0.44
尤度	0.4	標準偏差	0.04
最大	0.7	消損補正係数; 三角	
焼損(棟/年); 正規		最小	0.30
平均	47460	尤度	0.42
標準偏差	942	最大	0.55
林野火災			
CO ₂ 発生量(t/ha); 正規		焼損面積(ha/年); 正規	
平均	72.00	平均	2,634.00
標準偏差	7.20	標準偏差	566.00

を加熱されるコンクリート量に乘ずることにより1棟あたりの非木造建物から発生する総CO₂量を求めた。林野火災によるCO₂発生量は、実験火災により測定された森林1haから発生する単位あたりCO₂量に林野火災による平均消失林野面積⁽³⁾を乗ずることによって求めた。以下に、各火災種別ごとの年間CO₂発生量を予測するための式を示した。

1) 木造建物火災

火災による木材燃焼量(Mw)、1棟あたりのCO₂発生量(Gw_{CO2})および年間CO₂発生量(Gwy_{CO2})は次の式から求められる。

$$Mw = (W/d) \times 2 \times bw \times \rho \quad \dots (1)$$

$$Gb_{CO2} = Mw \times G \quad \dots (2)$$

$$Gy_{CO2} = Gb_{CO2} \times Nw \times \alpha \quad \dots (3)$$

2) 非木造建物火災

木造建物以外についても木造建物と同様に、コンクリート中のセメント量をCcとすれば、火災による被加熱コンクリート量(Mn)、1棟あたりCO₂発生量(Gn_{CO2})および年間CO₂発生量(Gny_{CO2})は次の式から求められる。

$$Mn = [A/a] \times a \times 4 \times bn \quad \dots (4) \quad ([]: \text{除した値を整数化})$$

$$Gn_{CO2} = Mn \times Cc \times C \times Gn \quad \dots (5)$$

$$Gny_{CO2} = Gn_{CO2} \times Nm \times \alpha \quad \dots (6)$$

3) 林野火災

林野火災により発生する年間CO₂量(Gfy_{CO2})は、林野単位面積あたりの火災によるCO₂発生量(Gf)および年間の林野火災による焼損面積(Nf)から求められる。

$$Gfy_{CO2} = Gf \times Nf \quad \dots (7)$$

さらに、火災による加熱深さ、建物表面積などは定数ではなく変動可能なパラメータであることを考慮して、これらのパラメータが変動した場合を想定した感度分析シミュレーションを行った。ここで、各種パラメータの設定条件は表2に示した。

木造建物について、1棟あたりの木材量は建築延べ床面積が30坪から100坪の間で三角分布するとし、木材量を板材へ換算するための板厚は5cm~10cmの範囲であるとした。燃焼厚さについては燃焼が物理化学的な現象であることから標準偏差を平均値の10%とした正規分布、燃焼ガス発生量についても同様の理由から正規分布を設定した。焼損程度を反映するための補正係数は、最小30%、最大70%の三角分布を設定した。また、年間の焼損棟数については消防統計より過去10年間の実際のデータの平均および標準偏差を利用して正規分布を設定した。

非木造建物については、延べ床面積の平均値は経済情勢や地域によって変動することから標準偏差を平均値の10%とした正規分布、また、区画面積についても同様の理由から標準偏差を平均値の10%とした正規分布を設定した。コンクリート部分の被加熱深さはコンクリートの材齢および施工条件ならびに施工後の使用環境などによって異なることが明らかであるが、正規分布を仮定するための根拠はないことから、最小値1cm、最大値4cmの三角分布を設定した。セメント中のCaCO₃含有比は材齢に依存する部分があると思われるが、製造プロセスが確立されていることおよび均一な品質の確保という観点から平均値より大きく離れていることは考えられなかったため、最小値0.5、最大値0.7、最頻値0.6の三角分布を設定した。また、コンクリート中のCaCO₃から発生するCO₂量を表すCO₂発生比は化学反応式から得られる0.44が最大であることは明らかであること、そして、発生量は正規分布にしたがって確率的に変動すると考えられることから、0.44より左側だけを対象とした正規分布を設定した。焼損の程度のばらつきによる影響を考慮した焼損度補正係数は、非木造建物は火災時における防火システムの稼働状況(成否)により大きく影響されることは当然であるが、本検討では木造建物と同様、最小値0.3、最大値0.6、最頻値0.4の三角分布を設定した。

林野火災については、林野火災の実際の状況に関するデータがほとんど得られていないことから、火災によるCO₂発生量はランダムに変動することを勘案して、標準偏差を平均値の10%とした正規分布を設定した。また、火災による焼損面積は様々な火災状況が考えられることおよび火災自体がランダムな現象であることから、過去10年間(平成5年から平成14年)の消防統計データから求めた平均値と標準偏差を持つ、正規分布を設定した。

3. 結果および考察

表3は表1に示した条件のもとに火災種別の年間CO₂発生量を推定した結果である。火災により木造建物、非木造建物（RC造、RC造、S造など）、および林野から発生するCO₂量は、それぞれ177、91、および167千ton/年となり、木造建物と林野からの発生量が近似した値となっている。これに対して、木造以外の構造の建物から発生するCO₂量は少ない値となっている。年間焼損棟数でみれば、非木造建物の方が多いにもかかわらず、木造建物からのCO₂発生量が少なかった原因は、1棟あたりのCO₂発生量が異なるからであるといえる。一般的には、非木造建物は木造建物よりも規模（延べ床面積）が大きいことを考え合わせても、木造建物からのCO₂発生量が多いことがわかる。ちなみに、人間一人あたりの年間CO₂発生量は9.53トンとすれば、わが国において火災により発生するCO₂量は45,645人分のCO₂発生量と等しいことがわかる。

つぎに、推定に用いたパラメータが変動する場合についてモンテカルロ・シミュレーションを行った結果を表4に示した。表3および表4における年間CO₂発生量の値は、平均値を比較する限りでは木造建物は171×10³から238×10³ton/年へと34%、非木造は91×10³から94×10³ton/年へと3%、および林野は167×10³から191×10³ton/年へと14%増加していることがわかる。原因は、分布パターンが大きい数値側に偏った設定になっていた部分があったからであると思われる。パラメータの分布範囲が広ければ広いほど、シミュレーションで得られる値は確定的な値を中心に広く分布することになる。非木造建物火災と林野火災とでは、確定的な計算結果と確率的な計算結果の平均値との間に大きな差違は認められなかった。また、火災種別による尖度の値の差違は顕著ではないが、歪度は林野が最小であるのに対して木造建物が最大となっていることから、林野のシミュレーション結果はほぼ正規分布に近いのに対して、木造建物は得られた結果の度数分布が右側に偏っていたことがわかる。

さらに、シミュレーションによって得られた火災種別ごとの最大値を見てみると、火災の条件によっては平均値では予測できないほど大きな年間CO₂発生量が得られることがわかる。このように確定的な推定手法では予想できないような結果を検討できるのは、パラメータの分布を設定してシミュレーションを行ったことによる効果であったと考えられる。木造建物、非木造建物および林野火災における年間CO₂発生量の推定値度数分布をそれぞれ図1、図2および図3に示した。ただし、度数分布における度数カウントは1000回あたりの発生度数として示した。各火災種別とも同様の度数分布パターンを形成しているが、木造建物は非木造建物および林野に比較して分布の中央部に厚みがあることがわかる。各構造種別について、シミュレーション結果の累積分布を表5に示した。単純計算およびシミュレーションにより得られた

表3. 火災種別年間推定CO₂発生量

火災種別	CO ₂ 発生量(10 ³ ton/年)
木造建物	177
非木造建物	91
林野	167

表4. シミュレーション結果

各種火災による年間CO₂発生量(10³ton/年)

項目	木造建物	非木造建物	林野
試行回数	10000	10000	10000
平均値	238	94	191
中央値	226	90.3	190
標準偏差	74.7	30.3	43.6
歪度	0.8	0.64	0.24
尖度	3.6	3.37	3.42
変動係数	0.31	0.32	0.23
最小範囲	92.6	31.2	59.4
最大範囲	540.6	221.3	359.1
標準誤差	2.36	0.96	1.38

注) 試行回数は連続バッチによる

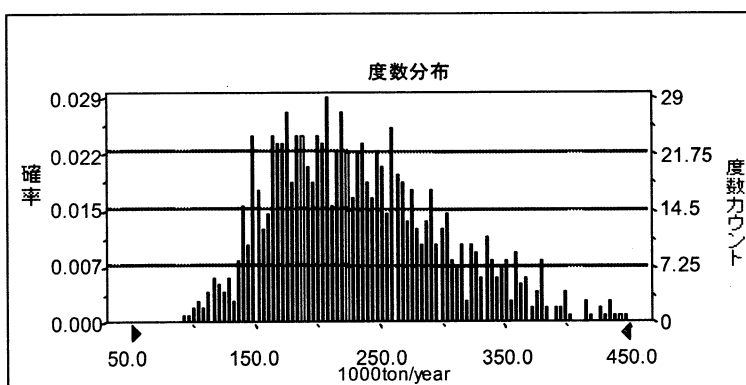


図1. 木造建物火災による年間CO₂発生量シミュレーション結果(度数)

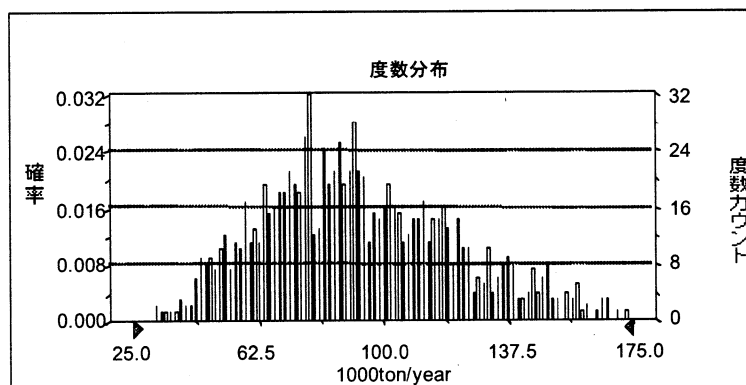


図2. 木造建物火災による年間CO₂発生量シミュレーション結果(度数)

年間CO₂発生量を比較すれば、それぞれ木造建物では20%および60%、非木造建物では50%および60%、林野では30%および50%となっており、木造建物においてはシミュレーションにより得られる情報が最も多いことがわかった。木造とは反対に非木造建物ではパラメータの分布を考慮したシミュレーションが解析結果に及ぼす影響は小さかった。

さいごに、感度分析の結果を表6に示した。木造建物からのCO₂発生量は使用している木材量の変動、つぎに焼損程度の推定がシミュレーション結果に大きな影響を及ぼすことがわかった。これら2つのパラメータを制御することにより99%の確率でCO₂発生量を制御することができるものと考えられる。非木造建物についても同様に、火災時に加熱されるコンクリートの深さおよび焼損程度の仮定条件、そして床面積の大きさがCO₂発生量の推定に大きな影響を及ぼす傾向が認められた。林野火災については、林野単位面積あたりのCO₂発量よりも焼損面積そのものが、火災による年間CO₂発生量の推定に74%もの影響力があることが判明した。このようにシミュレーションのメリットは複数のシステムパラメータの中から重要なものを抽出できる点である。今回の研究結果によれば、火災による地球温暖化への影響は小さいものと判断することになるが、グローバルな観点からみれば、火災種別は多種多様であり、また火災発生件数およびその規模も多岐にわたることから、今回とは異なる結果が導かれる可能性もあると考えられた。

4. 結 論

建物および林野火災から発生する二酸化炭素ガスの推定を行い、地球温暖化への影響について検討を行った結果、以下の結論を得ることができた。

- (1)日本における全火災から発生する年間のCO₂量は最大でも45,645人分の年間CO₂排出量と等しいこと、そして
- (2)確率シミュレーションによれば、木造建物では使用木材量、非木造建物では火災加熱深さ、林野では焼損面積が推定結果に最も大きな影響を与えることを示した。ただし、より正確なデータによる解析および実測データの蓄積は今後の検討課題である。

(参考文献)

- (1)堀内三郎“建築防火”、朝倉書店、pp32-34、(2)日本火災学会“新版建築防火教材”、工業調査会、pp23-28、(3)消防庁“平成15年版 消防白書”、ぎょうせい、pp17-39、(4)山田順治、有泉昌“わかりやすいセメントとコンクリートの知識”、鹿島出版会、pp22-36、(5)国土交通省総合政策局“建築統計年報”、(財)建設物価調査会、pp528-545

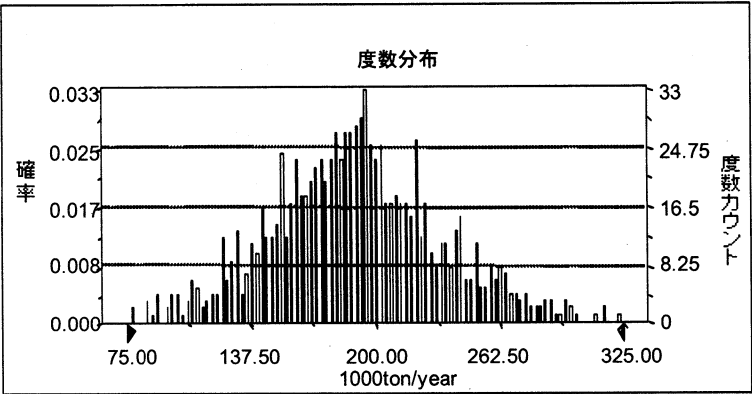


図3. 林野火災による年間CO₂発生量シミュレーション結果(頻度) 生

表5. シミュレーションにより得られた年間CO₂発生量の分布パーセンタイル(発生量単位は1000ton/年)

パーセンテージ	木造建物	非木造建物	林野
0%	93	31	59
20%	172	68	155
40%	208	83	180
60%	247	98	198
80%	297	119	225
100%	541	221	359

表6. シミュレーションにおける感度分析

木造建物		非木造建物		林野	
パラメータ	寄与率	パラメータ	寄与率	パラメータ	寄与率
木材量	66%	加熱深さ	74%	焼損面積	84%
焼損補正係数	33%	焼損補正係数	13%	CO ₂ 発生率	16%
CO ₂ 発生率	1.2%	床面積	9%		
材料厚換算率	0.2%	CO ₂ 発生率	2%		
燃焼厚さ	0.1%	CaCO ₃ 量比	1.2%		
年間焼損棟数	0%	区画面積	0%		