

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360240

研究課題名（和文） 住宅居住者の特性を考慮した火災時の人命安全評価手法の開発

研究課題名（英文） Development of evaluation method for human safety in residential fire by taking into consideration of residential characteristics

## 研究代表者

菅原 進一（SUGAHARA SHINICHI）

東京理科大学・総合研究機構・教授

研究者番号：90011220

## 研究成果の概要（和文）：

本研究では、綿布団の燻焼に伴う一酸化炭素の生成量、木材を可燃物とする換気支配型燃焼に伴う一酸化炭素の生成量に関するモデルを実験から求め、二層ゾーンモデルの入力とすることで空間の二酸化炭素濃度を予測できることを確認した。また、統計分析から死者発生火災に関する特徴を抽出すると共に対策を整理し、その典型例を取り上げた住宅火災における人命安全評価手法のケーススタディを通して、住警器の連動警報の効果等を分析した。

## 研究成果の概要（英文）：

The CO yield models in smoldering of cotton futon and ventilated burning of wood in compartment were experimentally-derived. Inputting these models to two-layer zone model of smoke movement, it was verified to be able to predict approximate CO concentration in the model compartment used in experiments. And, the characteristics of deadly fires were extracted from statistical data of fire report and its measures for safety were organized against each fire danger. The effects of interlocking residential fire alarm were evaluated through the case studies for human life safety in typical residential model.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2012年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
年度			
年度			
総計	12,900,000	3,870,000	16,770,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：住宅火災 燃焼 煙 避難 救助

## 1. 研究開始当初の背景

住宅火災の人的被害は、労働災害や交通事故による死亡者数が漸減しているのに対して、依然として1,000人を超える水準にあり、建物火災による死者数の約9割を占めている。

近年、住警器の設置義務が消防法に規定され、アメリカ等での実績から死者数の減少が期待されるが、高齢者の死者数が全体の約6割を占め、僅かながら増大傾向を示しており、世界的に見ても未曾有の高齢化が進むわが

国の社会情勢を踏まえると決して楽観はできない。

本研究は、建物火災で生じる死者の大半を占める住宅火災を対象として、その死者発生の複雑なメカニズムを住宅の空間模型内での可燃物燃焼実験により科学的に分析することで、人的被害を低減させる解決策を見出すことを目的としている。また、住宅火災の燃焼・煙流動性状を計算モデルで再現可能とし、これに居住者特性に応じた避難行動・救助等の屋外への退避予測を組み合わせて住宅火災人命安全評価手法を開発する。これにより、2006年に消防法に設置義務が規定された住宅用火災警報器（以下、住警器）の有効性を評価でき、また居住者特性に応じた効果的な対策を分析することで、住宅に適した新たな防災対策の必要性の提言や創出を促進できると考える。

## 2. 研究の目的

本研究では、住宅火災の死者発生事例から典型的な死者発生プロセスを抽出し、その死者発生プロセスに着目して、空間模型内で燃焼実験を行い、測定データに基づいて死者発生メカニズムを分析する。また、この実験での燃焼室での温度、煙濃度、ガス濃度を再現できる計算モデルを開発する。一方、居住者特性に応じた屋外への退避方法については、死者発生事例でなく住宅火災事例全般を対象として幾つかのパターンに類型化し、シミュレーション用の退避モデルを開発する。これら燃焼・煙流動予測と退避予測を時間軸で相互比較することで、居住者特性を考慮した住宅火災人命安全評価手法を開発する。

## 3. 研究の方法

本研究は、以下に示す3つの研究対象に応じて実施したため、研究の方法についても3つに分類して整理する。

### (1) 死者発生リスクの高い住宅火災の分析 (住宅火災における死者発生メカニズムの分析)

総務省消防庁の火災報告並びに死者の調査票のデータ（最大で1995年～2008年の14年分のデータ）を用いて、主に死者が発生した住宅火災を対象として、出火時の状況、死者の属性や身体的状態、死者の発生の経過、死因、焼損床面積などを集計し分析を行う。分析を通じて、死者発生火災の特徴を抽出整理すると共に、死者発生のメカニズムとその対策を検討する。

### (2) 住宅内煙流動解析手法の開発

#### ① 燃焼に伴う一酸化炭素ガス濃度の予測

(1)の統計データの分析を通じて、住宅火災におけるたばこを着火源、布団などを着火物とした死者を伴う住宅火災では、焼損床面積が1㎡以下の火災が比較的多く存在するこ

とから、燃焼による一酸化炭素（以下、CO）の生成が、例えば着火物が布団であることから推測されるように就寝中の居住者にとって死に至らしめる脅威として認識することができる。そこで、燃焼によるCO生成による住宅火災での危険性を評価するための予測手法を二層ゾーンモデルに基づいて開発する。入力条件となる燃焼に伴う火源からのCO発生量については、燃焼に伴うCOイールド（燃焼に伴う可燃物の重量減少に対するCO生成量）と、その重量減少速度の時間経過に対するモデルを実験データから得ることとする。

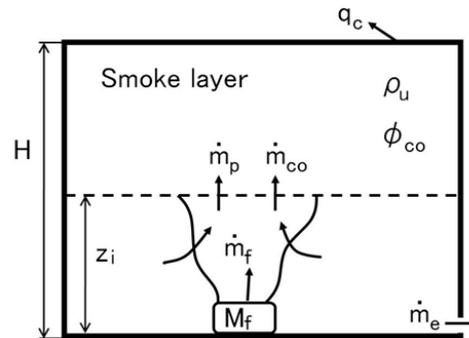


図1 二層ゾーンモデルによる煙層内CO予測モデルの概念図

#### ② フラッシュオーバー後の盛期火災時の一酸化炭素ガス濃度の予測

同様に(1)の統計データの分析を通じて、おおよそ住宅火災の死者の3/4程度が出火室にいた人であるのに対して、非出火室にいた人は1/4程度を占めることと、後者はCO中毒や窒息を死因とする割合が火傷を死因とするものよりも大きい。出火室にいた人が亡くなる場合は、やはり燃焼部分に近いこともあり、火傷を死因とする割合が高い。出火室では着衣着火や燃焼拡大の速さ、さらには人の身体不自由などのように、火災発生そのものを絶たなければ解決できない問題を多く含んでいると考えられ、発火源となる火気の取扱の注意、着火物となる可燃物の管理や製品に難燃材料を積極的に取り入れることなどで、一定の解決を図ることが考えられる。これに対して、非出火室の死者に関してはCO中毒や窒息が死因として割合が高いことから、特に火災室でのフラッシュオーバー

(以下、F0)後のCOの生成量と他室への流動性状を予測することが要となる。そこで、可燃物の重量減少を測定しながら区画内部の温度やCO等を測定する区画模型実験を通じて、区画火災におけるCO生成モデルを検討し、さらにゾーンモデルの適用性を検討する。より具体的には、COの生成モデルとして、可燃性ガスに対する供給酸素量の比（化学量論比）に基づくCO生成モデルの適用性につ

いて検討する。

### (3)住宅火災人命安全評価手法のケーススタディ

ある居住者モデル並びに待避シナリオを想定し、モデル住宅での火災並びに煙流動性状を予測し、住宅用火災警報器の効果やバルコニーでの待避などの効果を分析するためのケーススタディを実施する。その際、熱暴露（温度）、毒性ガス（一酸化炭素）、窒息危険性（二酸化炭素）、移動困難性（煙の減光係数）を予測し評価する。避難行動の予測には、待避シナリオを予め設定した上で避難に要する時間を予測し、煙流動性状の予測には、CFDによる解析を用いた。

## 4. 研究成果

### (1)死者発生リスクの高い住宅火災の分析

出火場所・発火源・着火物を組み合わせて、死者数が多い上位 10 組を表 1 に示した。居室においてタバコから寝具類へと着火する火災が、10 年間で 1,012 人と最も多くの死者を発生しており、不明を除いた全体の 17.6% を占めている。これは 2 位の「居室・タバコ・ゴミ類」の約 2.8 倍であり、「寝タバコ」による死者数が突出していることが分かる。また、上位 10 組の発火源は「タバコ」、「ストーブ」、「コンロ」に集中しているが、着火物は 10 組の中に 7 種類が入っており、発火源と比べると多くの物品に分散している。

表 1 死者発生住宅火災における出火場所・発火源・着火物の組み合わせの上位 10 組

順位	出火場所	発火源	着火物	死者数	割合 [%]
1位	居室(Liv)	タバコ(Cig)	寝具類(Fut)	1,012	17.6
2位	居室(Liv)	タバコ(Cig)	紙・ゴミ類(Pap)	357	6.2
3位	居室(Liv)	ストーブ(Hea)	寝具類(Fut)	332	5.8
4位	居室(Liv)	タバコ(Cig)	床(Flo)	286	5.2
5位	居室(Liv)	ストーブ(Hea)	衣類(Clo)	272	4.7
6位	居室(Liv)	ストーブ(Hea)	引火性液体(Liq)	179	3.1
7位	台所(Kit)	コンロ(Coo)	衣類(Clo)	150	2.6
8位	台所(Kit)	コンロ(Coo)	動植物油(Oil)	96	1.7
9位	居室(Liv)	タバコ(Cig)	繊維製品(Tex)	92	1.6
10位	居室(Liv)	タバコ(Cig)	衣類(Clo)	91	1.6
住宅の死者発生火災全件 (いざれかの項目が不明の場合を除く)				5,738	100

N = 10,198  
火災報告 死者の調査票(1999年~2008年)より  
住宅火災について集計(放火自殺者を除く)

火災と人との関係性を示す指標として、両者の相対的な位置関係を分析に取り入れる。図 3 に死者発生住宅火災の出火場所と、その火災で死亡した人との相対的な位置関係を示した。これは、住宅火災で死亡した人が出火時に出火室にいたかどうか、および死亡にいた場所が出火時にいた場所と同じであったかどうかによって、死者全体を 4 つのグループに分けた内訳である。結果を見ると、死者全体の 65.3% が出火時に火室にいた人で、出火室以外にいた人は 25.5% である。また、全体の 51.7% は出火時に火室におり、その場所で死亡している。出火時に火室以外にいた人については、その場所で死亡する人よ

りも、別の場所に移動して死亡した人の方が若干多い。

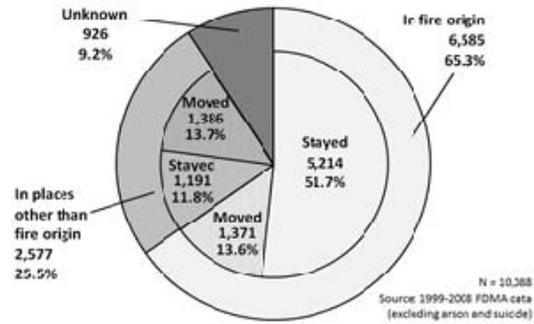


図 3 出火場所と死者との相対的な位置関係

図 4 は、死者と出火場所との相対位置で分類した 4 つのグループに属する死者が発生した火災それぞれの件数を、全数を 1 とする焼損床面積についての累積相対度数分布で示したものである。なお、図 4 において、焼損床面積が 0 m<sup>2</sup> (1 m<sup>2</sup>未満) の火災は、0.1 m<sup>2</sup> としてプロットしている。この図から、各グループについて、死者が発生した火災の規模（鎮火時の焼損床面積）の分布を読み取ることができる。出火時に火室にいなかった人が死亡した火災では、規模の大きな火災の割合が高く、焼損床面積が 10 m<sup>2</sup>以下の火災の割合は 6%以下である。出火時に火室にいた人がその場で死亡するケースだけが、住宅火災全体の分布よりも小規模火災の割合が高く、焼損床面積が 1 m<sup>2</sup>以下の小規模な火災の割合が 16%である。火災との距離が近い人ほど、小さな火災でも死亡している人の割合が高いことが分かる。

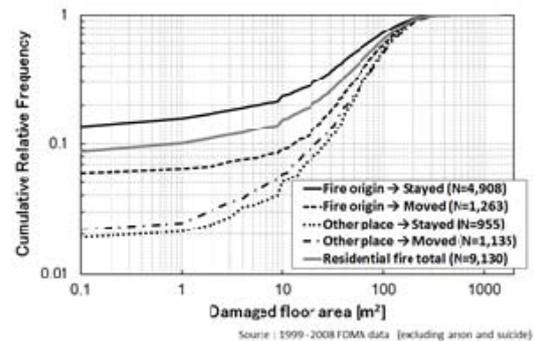


図 4 出火場所と死者の相対位置と火災規模の関係

住宅火災死者の 1/4 は出火時には火室にいなかった人である。これらの人が、避難時間に余裕があるにもかかわらず死亡に至る原因を探るため、死者発生シナリオの分析を行った。出火時に火室以外にいた人が死亡した火災について、死者数が多い出火場所・発火源・着火物の組み合わせ上位 10 組

について図5に死因の内訳を示した。これらのケースでは1位の組み合わせでも全体に占める割合は10%に満たず、出火原因が分散していることが分かる。死因内訳では、煙が原因で死亡した人が半数以上(平均61.3%)であることが一般的な特徴であるが、出火原因による顕著な差はみられない。すなわち、出火場所以外で死亡するケースでは、小規模火災と比べて、死因が出火原因から受ける影響が小さい。

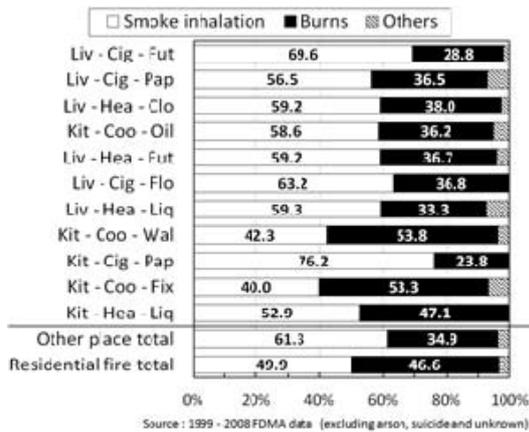


図5 出火時に出火室以外にいた人が死亡するケースでの死因内訳

死者が発生した火災報告データを集計し、発火源と着火物の組み合わせから火災の種類として火災拡大が徐々であるか急激であるかを分類し、発火源と死者の年齢層の組み合わせから被害に遭う人を特定し、さらに発火源と死者発生時の経過の組み合わせから火災時の状況を特定し、死者発生火災のシナリオを整理した(図6,7)。

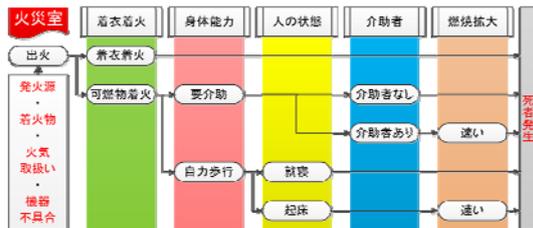


図6 出火室における死者発生シナリオの類型化

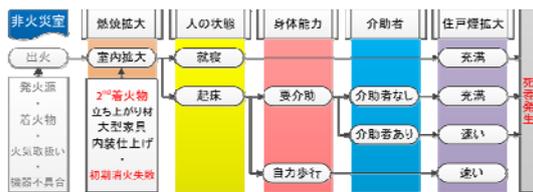


図7 非出火室における死者発生シナリオの類型化

(2) 住宅内煙流動解析手法の開発

① 焼焼に伴う一酸化炭素ガス濃度の予測

本検討においては、綿布団の重量減少のグラフを外挿して重量減少曲線( $M_f$ )を求め(図8)、重量減少率( $\dot{m}_f$ )に燃焼熱を掛け合わせて発熱速度変化( $\dot{Q}_f$ )を求めるとともに、それにCOイールド値( $Y_{CO}$ :式(2))を掛け合わせてCO発生率( $\dot{m}_{CO}$ )を求め、それらをゾーンモデルに入力してCOを含む煙層がどの程度の時間で床面付近に達するか、煙層中のCO濃度がどのように変化するか予測計算を行った。図1に計算モデルの模式図を示す。

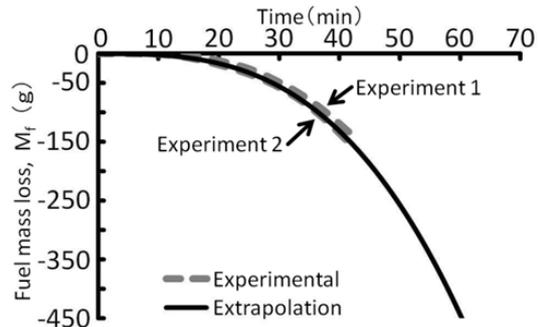


図8 布団(綿100%)の重量減少のようす(実験値と外挿曲線  $M_f = M_0 - 9.5 \times 10^{-9} t^3$ )

計算条件としては、床面積  $10.0 \text{ m}^2$ 、天井高  $2.4 \text{ m}$  の室内(6畳間に相当)で、床面に置かれた綿布団が焼焼を開始し、その後発炎燃焼に至ることなく120分間、燃焼部分が拡大しながら焼焼を続けることを想定した。焼焼時には様々な燃焼生成ガスが発生するが、そのうちのCOだけに着目して煙層中の濃度がどのように変化するか計算を行った。

図9は、火災発生に気づかず人が寝ていることを想定し、煙層が床面付近(床面から30cm)に達した後にその人が曝されるCO暴露量の変化を時間の関数として示したものである。煙層が床面付近に達した後、CO濃度が単調に増加するので、CO暴露量( $D_{CO}$ )は急激に増大し、64分経過時に許容限界値を超える。

CO暴露量が許容限界値( $3.5\% \cdot \text{min}$ )を超え、COHb濃度が30%~40%になると、激しい頭痛、悪心、嘔吐、運動能力の喪失などの症状を呈する。この時点までに避難できなければ、自力避難は極めて困難な状況となると考えられる。

図9に示した計算結果は、6畳間における布団の焼焼という、一つの典型的な例を示したものである。部屋の広さが異なれば、CO濃度変化のようすも変化する。燃焼物や換気条件の違いによっても、当然、結果は変化する。しかしながら、典型的な条件で、1時間程度の時間で許容限界値を超えるという結果は、焼焼火災の危険性を物語っている。すなわち、睡眠中の1時間というのは決して長い時間ではなく、熟睡したまま気づかずに意識を失

って、そのまま燻焼火災により発生した CO を吸い続けて死に至る可能性は十分あり得ることである。

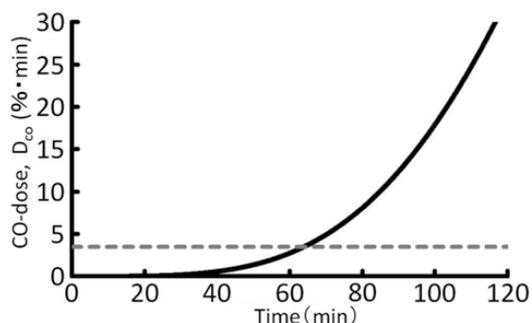


図 9 6 畳までの布団燻焼による就寝状態の人の CO 暴露量の時間変化

### ②フラッシュオーバー後の盛期火災時の一酸化炭素ガス濃度の予測

小規模模型区画内でのクリブの燃焼実験結果として、図 10 に一酸化炭素の発生量と重量減少速度の関係について前方と後方を比較した結果を示す。

図 10 に示すとおり、傾きが 0.25 のほぼ直線的な関係になっていることが分かる。すなわち、重量減少速度と重量減少量に占める CO 生成量との関係に比例関係があることがわかった。ただし、重量減少速度が大きいとき、つまり、開口が大きいときには、区画前後の値の差が大きく、直線から若干低めの値を示している。その原因は、一酸化炭素濃度が出口付近で高めの値となっているため、生成された一酸化炭素がより多く外に排出されたためと考えられる。

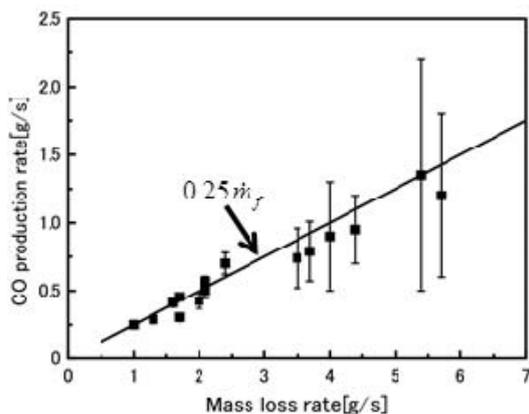


図 10 一酸化炭素の発生量と重量減少速度の関係で前方と後方の比較 (プロットは前方と後方の単純平均値)

さらに、実験における重量減少速度  $m_f$  を入力値として、さらに CO 生成量は図 10 に示した  $0.25m_f$  の値を用いて、一般的な二層ゾーンモデルの概念に基づく解析を、開口因子を変

化させて実施し、今回の実験結果と比較したところ、図 11 のように解析値と実験値 (ただし、平均的な値) がおおむね等しい結果が得られ、解析による予測計算の適用性も確認できた。

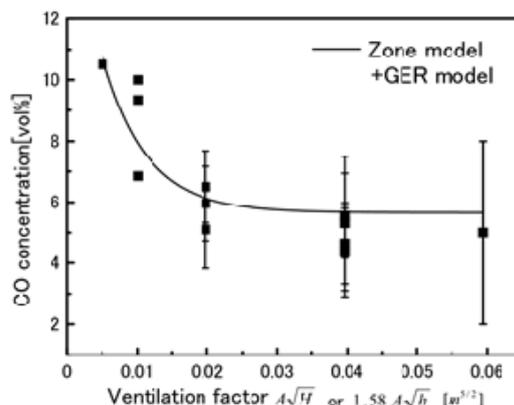


図 11 実験値とゾーンモデルに基づく解析値の一酸化炭素濃度の比較

加えて、中規模区画模型を用いて、小規模模型による検討結果と同様の結果が得られること、さらに隣接室を設けた区画模型で、区画間の扉の仕様 (木製フラッシュ、修正木材、鉄製) の違いによる隣接室での CO 濃度の変化について測定した。

### (3)住宅火災人命安全評価手法のケーススタディ

居住者モデルとして両親+子供 2 人+老人 1 人を設定し、建物モデルとして 2 階建て住宅を設定し、就寝時にリビングで火災が発生した場合の住警器の連動警報の有無や廊下等の煙汚染状況等による 2 階でのベランダへの待避シナリオを整理した。

モデル火災 (ソファに着火して 1 MW で燃焼する火災) を 1 階居室に設定し、階段や廊下における熱暴露 (温度)、毒性ガス (一酸化炭素)、窒息危険性 (二酸化炭素)、移動困難性 (煙の減光係数) を評価した。例えば、主な避難経路となる階段において避難上支障を来す状態になるのは、移動困難性が最も早く約 110 秒、次に熱暴露で約 170 秒であり、視界不良による移動困難性がまず影響して行動を奪い、その後に熱やガスが身体に影響する状況に至ると考えられる。

こうした状況において、住警器によって就寝中の人が目覚まし避難する状況を見ると、警報が連動式のものの有効性が高いこと、また要介助者がいる場合には、要介助者以外の人は住警器の発報を頼りに行動を開始し、出火点確認並びに初期消火失敗の判断を的確に行い、要介助者を介助して避難することが求められることなどを、ケーススタディを通じて明らかとした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

- ① 青山裕司, 山内幸雄, 水野雅之, 末信和也, 島津朋彦, 片桐正浩, 菅原進一, 住宅火災における死者発生経過の分析—一人の行動能力および出火室に対する相対位置と死因による経過の推定—、日本火災学会研究発表会概要集、査読無、2012、pp174-175
- ② 中濱慎司, 佐野友紀, 菅原進一, 原哲夫, 関澤愛, 水野雅之, 山内幸雄, 住宅火災の死者発生防止に関する研究(その4) 避難シミュレーションとCFD煙流動解析による比較分析、日本火災学会研究発表会概要集、査読無、2012、pp176-177
- ③ 中濱慎司, 佐野友紀, 菅原進一, 原哲夫, 関澤愛, 水野雅之, 山内幸雄, 住宅火災の死者発生防止に関する研究(その3) 避難シミュレーションとCFD煙流動解析による比較分析、日本建築学会学術講演梗概集、査読無、2012、pp103-104
- ④ 水野雅之, 関澤愛, 菅原進一, 山内幸雄, 佐野友紀, 原哲夫, 中濱慎司, 住宅火災の死者発生防止に関する研究(その1)—住宅火災での死者発生危険に関する火災統計データの分析—、日本火災学会研究発表会梗概集、査読無、2011、pp404-405
- ⑤ 青山裕司, 末信和也, 水野雅之, 山内幸雄, 松浦郁実, 菅原進一, 住宅における燻焼火災の危険性について(その1)—統計データの分析—、日本火災学会研究発表会梗概集、査読無、2011、pp112-113
- ⑥ 末信和也, 青山裕司, 水野雅之, 山内幸雄, 松浦郁実, 菅原進一, 住宅における燻焼火災の危険性について(その2)—酸化炭素濃度変化の予測—、日本火災学会研究発表会梗概集、査読無、2011、pp114-115

〔学会発表〕(計8件)

- ① 山内幸雄、統計データの分析から見た住宅火災の実情、東京理科大学グローバルCOEプログラム住宅火災安全シンポジウム、2013/2/26、東京理科大学森戸記念館
- ② 水野雅之、住宅火災シナリオと安全性評価のポイント、東京理科大学グローバルCOEプログラム住宅火災安全シンポジウム、2013/2/26、東京理科大学森戸記念館
- ③ 中濱慎司、住宅火災の死者発生防止に関する研究(その3) 避難シミュレーションとCFD煙流動解析による比較分析、日本建築学会、2012/9/13、名古屋大学
- ④ 青山裕司、住宅火災における死者発生経

過の分析—一人の行動能力および出火室に対する相対位置と死因による経過の推定—、日本火災学会、2012/5/21、宇都宮東部ホテルグランデ

- ⑤ 中濱慎司、住宅火災の死者発生防止に関する研究(その4) 避難シミュレーションとCFD煙流動解析による比較分析、日本火災学会、2012/5/21、宇都宮東部ホテルグランデ
- ⑥ 水野雅之、住宅火災の死者発生防止に関する研究(その1)—住宅火災での死者発生危険に関する火災統計データの分析—、日本火災学会、2011/5/17、東京理科大学森戸記念館
- ⑦ 青山裕司、住宅における燻焼火災の危険性について(その1)—統計データの分析—、日本火災学会、2011/5/16、東京理科大学森戸記念館
- ⑧ 末信和也、住宅における燻焼火災の危険性について(その2)—酸化炭素濃度変化の予測—、日本火災学会、2011/5/16、東京理科大学森戸記念館

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅原 進一 (SUGAHARA SHINICHI)

東京理科大学・総合研究機構・教授

研究者番号：90011220

(2) 研究分担者

山内 幸雄 (YAMAUCHI YUKIO)

東京理科大学・総合研究機構・准教授

研究者番号：70548388

水野 雅之 (MIZUNO MASAYUKI)

東京理科大学・総合研究機構・講師

研究者番号：40366448

(3) 連携研究者

佐野 友紀 (SANO TOMONORI)

早稲田大学・人間科学学術院・准教授

研究者番号：70305556