

平成 30 年 5 月 16 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06322

研究課題名(和文)乱流解析結果に基づく簡易な初期火災性状予測モデルの開発

研究課題名(英文)Development of simple initial fire property prediction model based on turbulent flow analysis results

研究代表者

永井 久也(NAGAI, HISAYA)

三重大学・工学研究科・教授

研究者番号：40283402

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：建築物の火災安全設計では、建築空間における火災性状の予測がまず基本となり、この予測には対象とする空間等に応じて、フィールドモデルおよびゾーンモデルの2種類の解析手法が用いられることが一般的である。このうち、ゾーンモデルは建築空間を一樣な性質を持つ1つまたは2つの検査体に分けて予測するものであり、その予測精度はフィールドモデルに劣るものの、その簡便さから設計実務についてはゾーンモデルが一般的に用いられており、特に初期火災性状予測には2層ゾーンモデルが広く用いられている。本研究では、CFDを用いたフィールドモデルによる初期火災予測結果を利用したより予測精度の高い2層ゾーンモデルの開発を行った。

研究成果の概要(英文)：In the fire safety design of buildings, the prediction of the fire properties in the building space is the basic principle. In this prediction, it is general that two types of analysis methods, a field model and a zone model, are used depending on the target space. The zone model predicts the building space by dividing it into one or two test bodies with uniform physical properties, and its prediction accuracy is inferior to that of the field model. However, due to its simplicity, the zone model is generally used for design practice, and the two-layer zone model is widely used especially for the initial fire property prediction. In this study, we developed a new two-layer zone model with higher prediction accuracy using the initial fire prediction results by field model using CFD.

研究分野：建築環境工学

キーワード：初期火災性状 フィールドモデル ゾーンモデル ボイド空間 排煙方式 簡易予測モデル

## 1. 研究開始当初の背景

建築空間の火災性状予測法は、上述のようにゾーンモデルとフィールドモデルの2つに大別される。ゾーンモデルはその建築空間の各物理量の平均値しか得られないので、内部の温度・流れ場についての詳細な情報を得ることは出来ないが、実際上の多くの火災安全対策上は、大略の平均値が判れば十分なことも多く、また計算時間等の面においても実用性に優れており、一般居室等の密閉型建築空間内の火災性状予測に広く用いられている。しかしながら、本モデルは開口部の大きなアトリウムや開閉式ドーム、ボイド型建築といった半外部空間を有する建築物では、建築周辺の外気風等の影響が大きく、また密閉空間でも換気量（排煙量）が大きい場合には、その適用には限界がある。したがって、外気風等の影響をも考慮可能なフィールドモデルは非常に有効的な予測手法と言える。しかしながら、CFDを基本とするフィールドモデルは、計算時間やその取扱いの難しさ等の実用的面での問題に加え、火災時の大きな空気密度の変化による高温浮力流れが全体の流れ場に与える影響が大きく、通常の室内温熱環境予測等に用いられる非圧縮性流体を対象とした乱流モデルをそのまま適用することが必ずしもできないといった種々の問題を有している。

## 2. 研究の目的

上述の観点から、本研究では以下の3つの項目について検討を行い、それらの結果を踏まえて、最終的には、簡易かつ予測精度の高い新しい初期火災性状予測モデルの開発を行う。

(1)通常非圧縮性流体を対象とした乱流モデルと簡易圧縮性流体乱流モデルの比較検討

火災時の流れ場は大きな温度変化に伴い流体の密度変化も当然大きくなる。通常の室内温熱環境予測等に用いられる乱流モデルでは Boussinesq 近似が用いられるが、この近似は密度変化の影響を運動方程式の浮力項のみに残し、他は密度一定を仮定しているため、火災時のように温度変化が大きく、それに伴う流体の密度変化が大きな火災時の適用には問題がある。一方、火災時の煙流動等の流れは低マッハ数の流れであり、航空工学等の分野で用いられている通常の圧縮性流体の解析方法は、状態方程式により圧力を仮定するため、火災時の流れ場を精度良く解くのは現状では困難とされている。そこで本研究では、その取扱いが比較的簡易であるファブル平均に基づく圧縮性  $k-\epsilon$  乱流モデルを取り上げ、これによる初期火災性状を通常非圧縮性  $k-\epsilon$  モデルと比較検討し、どの程度の温度範囲であれば通常の乱流モデルでの予測が可能であるかを明らかにする。

(2)フィールドモデルと従来の2層ゾーンモデルの比較

通常の密閉型空間で火災が発生した場合の初期火災性状を乱流モデルによるフィールドモデルと従来の2層ゾーンモデルにより数値的に解析し、両者の差異を明らかにするとともに、従来の2層ゾーンモデルの適用限界について検討を行う。

(3)フィールドモデルによる第二種排煙方式の妥当性検証

平成12年建設省告示第1437号により第二種排煙方式が認められるようになり、以降、商業ビルなどにおける付室を対象として第二種排煙による排煙設備を計画する事例が散見されるようになった。また、最近ではこの方式をアトリウムなど、火災発生のおそれのある空間などにその適用を拡大解釈し適用する事例も出てきている。しかしながら、この第二種排煙方式は火災室内での給気流が煙の流動に及ぼす影響など、未解明の部分が残されており、その安易な適用には問題が多いことが多数の専門家から指摘されている。また、従来の2層ゾーンモデルにより初期火災性状を予測する場合には、通常の機械排煙方式（第三種排煙）と第二種排煙方式では、その仮定条件から、漏気が無い場合には同じ予測結果を与えることになり、第二種排煙適用に伴う問題点を事前に予測し検討することはできない。そこで、ここでは乱流モデルを用いて、第二種排煙方式が採用された比較的狭い非火災室（付室）に隣接火災室から煙が浸入した場合に、給気ファンによる給気の影響が煙層の成層化にどの程度影響を与えるかを明らかにすることにより、第二種排煙方式の妥当性検証を行うと共に、2層ゾーンモデルの適用限界についても明らかにする。

以上の3つの項目の検討結果を基に、従来の2層ゾーンモデルとは異なるCFD解析に基づく新しい2層ゾーンモデルの開発を行う。従来の2層ゾーンモデルは明確に分離された高温の煙層とそれ以外の空気層に各種の保存関係を適用し、理論的、数学的にその物理量を予測するもので、対象が火災現象であることから（実験検証が難しいことから）、その妥当性の検証は明確にはされていない。そこで、本研究では、実際の火災時の実測データに代えて、(1)で検討する乱流モデルによる解析結果を用い、それらを基に新しい2層ゾーンモデルを作成、開発する。

## 3. 研究の方法

(1)通常非圧縮性流体を対象とした乱流モデルと簡易圧縮性流体乱流モデルの比較検討

研究代表者が過去に実施したボイド空間を有する超高層集合住宅での実大模擬火災実験結果を通常非圧縮性  $k-\epsilon$  乱流モデルおよびファブル平均に基づく簡易な圧縮性  $k-\epsilon$  乱流モデルにより数値的に解析し、その温度場、流速場の予測の適用限界を明らかにする。さらに、両モデルの差異についての感度解析も実施し、どの程度の火源規模、温度

差程度までであれば通常モデルで予測可能であるかの限界条件を検討する。

## (2) フィールドモデルと従来の2層ゾーンモデルの比較

初期火災性状を予測する場合には、火災発生の可能性のある一般居室と火災発生の可能性は低く、隣室火災室からの漏煙の流入、流動を予測する場合とに大別される。後者の場合は、対象室に火源がないため、前者の場合と比して対象空間内が高温にならないことから、(1)で検討した結果を参考に、標準の非圧縮性  $k-\epsilon$  乱流モデルを用いて火災室の煙が非火災密閉型建築空間へ漏煙した場合の初期火災性状を解析する。ここでは、主に乱流モデルと従来の2層ゾーンモデルによる初期火災性状のシミュレーションの比較から、乱流モデルで初期煙性状を予測する際に重要な要素となる煙層の下端位置（煙層と通常の室空気の境界）について検討し、乱流モデルで予測する際の煙層下端位置の決定法についての検討を行った。

## (3) フィールドモデルによる第二種排煙方式の妥当性検証

上述のように、平成12年度の建設省告示第1437号により第二種排煙方式が認められるようになったが、その適用については多くの問題点が指摘されている。また、従来の2層ゾーンモデルの仮定条件下では、例えば、漏気がゼロである場合には、第二種、第三種排煙方式の差異がシミュレーション上ではなく、第二種排煙が現実的に有効に作動するか否かを事前に検討することはできない。そこでここでは、非火災室である比較的狭い付室空間を対象に、告示に示された基準の第二種排煙が設置、作動した場合の空間内部の煙性状についての検討を汎用の標準  $k-\epsilon$  乱流モデルにより実施し、給気ファンによる給気量および給気口位置での流入風速が空間内部の煙性状にどの程度影響するか、また、第二種排煙方式は想定通りに“煙を押し出す”ことのできる条件を定量的に明確化する。

## (4) CFD解析に基づく新しい2層ゾーンモデルの開発

従来の2層ゾーンモデルは明確に分離された高温の煙層とそれ以外の空気層に各種の保存関係を適用し、理論的、数学的にその物理量を予測するもので、対象が火災現象であることから（実験検証が難しいことから）、その妥当性の検証は明確にはされていない。そこで上述の(1)～(3)の結果を踏まえて、乱流モデルによる解析結果を用い、それらを基に新しい2層ゾーンモデルを作成する。

## 4. 研究成果

### (1) 通常非圧縮性流体を対象とした乱流モデルと簡易圧縮性流体乱流モデルの比較検討

#### ① 対象建築物および計算概要

本検討の対象建築物を図1、2に示す。既往の実大実験の対象建築物の寸法を簡略化

した建築物を対象とした。建物寸法は  $36.0 \times 36.0 \times 69.0\text{m}$  (高さ) で、中央に  $18.0 \times 18.0 \times 69.0\text{m}$  のボイド空間を有し、ボイド内底部西側に  $39\text{m}^2$  (幅  $13.0 \times$  高さ  $3.0\text{m}$ ) の開口部を有している。計算領域は対象建築物外部空間も含め、 $70 \times 70 \times 110\text{m}$  の領域を  $1\text{m}$  の等間隔メッシュに分割した。初期温度は、ボイド内・外一様  $20^\circ\text{C}$  とし、初期風速は無風とした。ここで用いた非圧縮性  $k-\epsilon$  モデルとファブル平均に基づく圧縮性  $k-\epsilon$  モデルの数値解法はMAC法による陽解法とした。

火源の位置、大きさは、ボイド内底部中央  $4.0\text{m}^2$  で、火源の発熱条件は、メタノールの低位発熱量の発熱速度  $1.335\text{MW}$  ( $=0.33375\text{MW}/\text{m}^2 \times 4.0\text{m}^2$ ) に周辺躯体への放射性分  $18\%$  を無視した値  $1.095\text{MW}$  ( $=1.335\text{MW} \times 0.82$ ) を第2種境界条件(熱流指定)として与えた。したがって、火源から建物躯体への放射、躯体内の熱伝導は考慮していない。解析対象時間は、初期火災を対象としているため、火源発熱開始から  $180$  秒間を対象時間とした。なお、以下では、火源発熱条件  $1.095\text{MW}$  を火源強度  $100\%$  と称する。

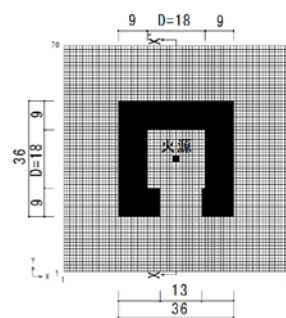


図1 平面図

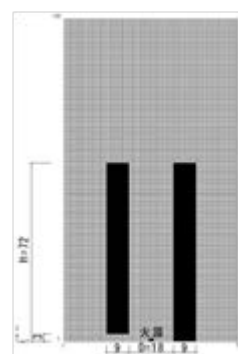


図2 断面図

### ② ボイド内熱性状比較

結果の一例として、発熱開始後（火災発生後） $180$  秒間のボイド下部開口部から内部への流入空気量の両モデルの比較を図3に示す。図中凡例の  $c4$ 、 $u4$  はそれぞれ簡易圧縮モデル、標準の非圧縮乱流モデルを示す。図に示すように、おけるボイド空間の温度性状およびボイド空間外への煙排出に極めて強い影響を与えるボイド下部開口からの新鮮外気流入量の両モデルによる差異は、火源強度に概ね比例して大きくなり、火源強度  $100\%$  時には、標準の非圧縮性乱流モデルは  $25\%$  程度

過大であった。

以上から、火災発生空間等の発熱量が大きな空間での性状予測には空気の圧縮性を考慮したモデルで予測すべきであり、標準の乱流モデルでの予測は火災空間からの漏煙による隣室非火災空間等の初期性状予測程度とすべきであると言えよう。

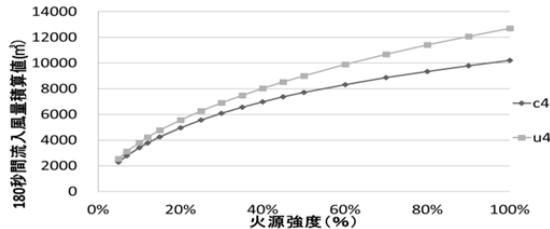


図3 ボイド下部開口からの流入風量積算値 (2) フィールドモデルと従来の2層ゾーンモデルの比較

① 対象建築物および計算概要

ここでは火災室からの漏煙があった非火災室の排煙性状を標準の  $k-\epsilon$  モデルによりシミュレーションし、上部煙層の下端位置を各種提案されている方法を用いて検討すると共に二層ゾーンモデルによる結果と比較検討した。

図4に解析対象室を示す。室は幅2.4m(X)、奥行き2.4m(Y)、高さ3.0m(Z)の容積を有した附室とした。附室で火災が発生することは考え難く、火災室から煙が蔓延し、附室に漏煙した煙(漏煙過程)を排煙する(排煙過程)ことを想定した。避難安全検証法に記された避難安全上の限界高さ1.8mまで漏煙した段階で漏煙過程を終了し、排煙過程を開始することを想定した。そのため、漏煙過程での漏煙量は  $6.9 \text{ m}^3$  (=(室高さ3.0m-限界高さ1.8m)×床面積  $5.76 \text{ m}^2$ ) とし、上部開口部より漏煙させた。煙は  $70^\circ\text{C}$  の空気 ( $\Delta T=50^\circ\text{C}$ ) とした。排煙過程では第三種排煙方式を想定した。給気口は  $0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$ 、排煙口は  $0.3\text{m} \times 0.3\text{m}$  とした。CFD解析では給気口及び排煙口にダクト管を挿入し、現実的な想定で解析を行った。表1にCFDの解析条件を示す。二層ゾーンモデルにはBRI20024を使用した。

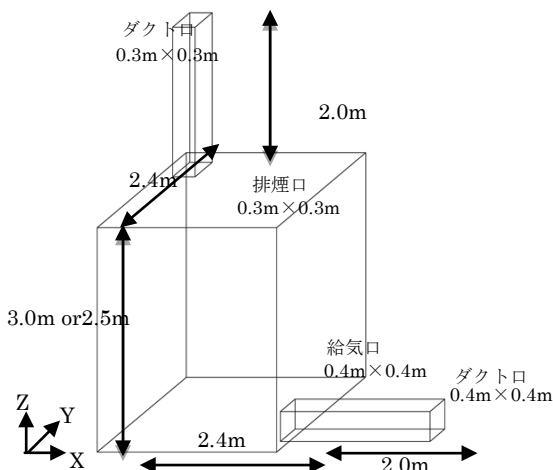


図4 解析対象室

表1 CFD解析条件

ソフトウェア	Stream Ver12	
計算アルゴリズム	SIMPLE C	
移流項	QUICK	
乱流モデル	標準の $k-\epsilon$ モデル	
メッシュ間隔	0.025mの等間隔メッシュ	
時間間隔	0.01秒間隔	
排煙方式	第三種排煙方式	
室内初期温度	20°C一様	
壁面境界	速度	1/7乗則
	温度	断熱
流入境界	境界条件	自然流入出
流出境界	境界条件	流量規定
k及びε	$k=u^2/100$ $\epsilon = [C_\mu]^{3/4} * k^{3/2} / l_m$ $C_\mu = 0.09, l_m = 1/7 * D$ (Dは吹出し径)	
メッシュ間隔	0.025mの等間隔メッシュ	

② フィールドモデルとゾーンモデルの比較と煙層下端位置の決定法についての検討

建築基準法に規定された排煙量の規定(床面積  $1 \text{ m}^2$ につき  $1 \text{ m}^3/\text{分}$ )より、 $5.76 \text{ m}^3/\text{分}$ の排煙風量を想定した。図5(a)~(c)にCFD解析による排煙開始から20秒毎の温度分布図(Y=2.05m断面)を例として示す。図5より、 $5.76 \text{ m}^3/\text{分}$ の排煙風量では煙層と空気層は比較的乱れず、成層化を保ちながら排煙が行われている。結果は省略するが、この程度の排煙量であれば排煙過程における煙層下端位置は二層ゾーンモデルとCFDモデルでは一致した。そこで、以下ではフィールドモデルの結果から煙層下端位置を決定するための手法の検討結果を示す。

図6にBRI2002及びCFD解析の各種計算手法による煙層下端位置の経時変化を示す。図6に示すように各種の煙層下端位置決定法の内、Least-squares methodと二階微分法以外は二層ゾーンモデルの煙層下端位置は概ね一致したが、別途検討した煙層熱量(温度)の比較結果と併せて考えれば、一階微分法およびN%法がフィールドモデルから煙境界層決定する手法としては妥当であると言えるが、N%はNの値が経験的に決定されることから一階微分法が最適であると言える。

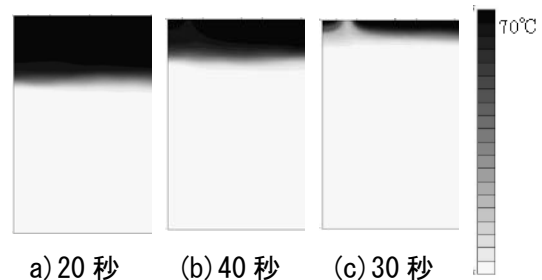


図5 室内温度分布(Y=2.05m断面)

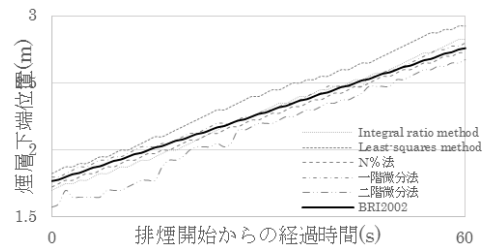


図6 煙層下端位置経時変化

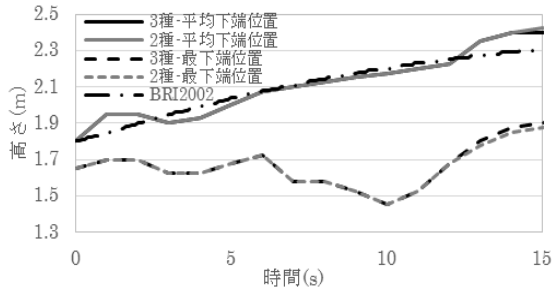


図7 煙層下端位置

(3)フィールドモデルによる第二種排煙方式の妥当性検証

① 対象建築物および計算概要

ここでは、(2)と同様の非火災室での機械排煙を通常の第三種排煙方式とした場合と第二種排煙方式とした場合の比較をフィールドモデルにより行った。したがって、計算対象および用いた乱流モデルの概要は(2)と同様(図4、表1)である。

② 排煙方式の違いによる排煙性状への影響

図7に天井から床上高さ1.8m地点まで蓄煙した後に機械排煙機が基準法定風量の3倍の風量で起動した場合の第二種、第三種排煙の平均煙層下端位置および煙層最下端位置を示す。図7に示すように、基準排煙風量時では両排煙方式による煙層最下端位置の差は全くなかったが(結果は省略)、基準風量の3倍時でも、排煙方式の違いによる差は小さい。したがって、この程度の風量であれば排煙方式の差異により排煙性状の差異は殆どなく、簡易モデルの開発に当たっては、機械排煙方式の種別をパラメータとする必要がないことが明らかとなった。

(4)CFD解析に基づく新しい2層ゾーンモデルの開発

① モデルの概要

これまでの検討結果を踏まえ、CFD解析結果を用いた簡易な2層ゾーンモデルの検討を行った。対象とするモデルは、前節(3)の結果から、ここでは先ず、安全区画である附室のような非火災狭小空間(図4)を対象とした。本モデルは、漏煙後ある程度煙が成層化した室内に下部から新鮮空気を給気して、完全混合域と一次元拡散域とに室内を二分割し、分割した各領域の温度を求める数式モデルである。各領域の温度はそれぞれ以下の微分方程式で与えられる。

・排煙口側の一次元拡散域の温度

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - U \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad \dots (1)$$

・給気口側の完全混合域の温度

$$VR \frac{d\theta}{dt} = F(\theta - \theta_{in}) \quad \dots (2)$$

ここで、完全混合域無次元高さRは以下で定義される。

$$R = \frac{\ell}{L} = R_0 + R_k t^* = \frac{\ell_0}{L} + R_k t^* \quad \dots (3)$$

$$t^* = \frac{F t}{V} \quad \dots (4)$$

$\theta$  : 温度[°C]、 $t$  : 時間[s]、 $\kappa$  : 温度拡散係数[m<sup>2</sup>/s]、 $U$  : 室水平断面効果速度[m/s]、 $z$  : 高さ[m]、 $R$  : 完全混合域無次元高さ[-]、 $R_0$  : 初期完全混合域無次元高さ[-]、 $L$  : 室高さ[m]、 $\ell$  : 完全混合域高さ[m]、 $\ell_0$  : 初期完全混合域高さ[m]、 $F$  : 排煙風量[m<sup>3</sup>/s]、 $R_k$  : 係数(=0.4)[-]、 $t^*$  : 換気回数[-]、 $V$  : 室容量[m<sup>3</sup>]、 $\theta_{in}$  : 給気温度[°C]

② 本簡易モデルの妥当性と適用範囲

本モデルで排煙性状を予測するためには、(3)式中の  $R_0$  (初期完全混合域無次元高さ) を決定する必要があるが、これは多数実施したCFD解析結果から初期温+0.1°C以上の任意位置での無次元高さとすることで、CFD解析結果を比較的良く再現することが可能であった。図8~10に初期温度を20°Cし、60°Cの漏煙により天井から床上高さ1.8mまで蓄煙がなされた後に機械排煙が起動した場合の室内温度の鉛直分布を示す。図に示すように、法定風量の2倍程度の風量までであれば、本簡易モデルはCFDによる室内鉛直温度分布を再現できており、本モデルはこの程度の排煙風量であれば十分設計に利用できると言える。

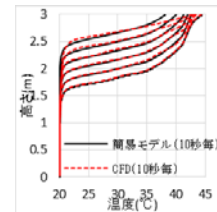


図8 室内温度鉛直分布 (法定基準排煙量時)

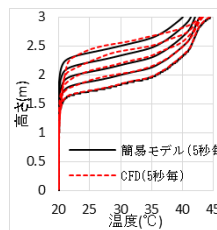


図9 室内温度鉛直分布 (法定基準排煙量の2倍時)

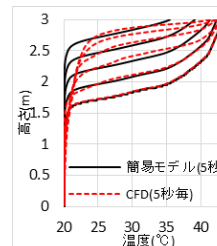


図10 室内温度鉛直分布 (法定基準排煙量の3倍時)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 8 件)

1. 金児和輝、永井久也、北野博亮、岩田剛、大規模建築空間における初期火災性状の数値解析、その3. ボイド空間スケールと排煙性状の関係、日本建築学会大会、学術講演梗概集、A-2、査読無し、広島、2017、pp. 263-264
2. 金児和輝、水口由介、永井久也、北野博亮、岩田剛、ボイド空間火災時の排煙性状に与える下部開口の効果、日本建築学会東海支部研究報告集、第 55 号、査読無し、名古屋、2017、pp. 337-340
3. 水口由介、永井久也、北野博亮、岩田剛、非火災狭小空間における機械排煙時の排煙性状に関する研究、日本建築学会東海支部研究報告集、第 55 号、査読無し、名古屋、2017、pp. 333-336
4. 金児和輝、水口由介、永井久也、北野博亮、岩田剛、大規模建築空間における初期火災性状の数値解析、その2. ボイド空間における下部開口部からの流入空気量の検討、日本建築学会大会、学術講演梗概集、A-2、査読無し、福岡、2016、pp. 359-360
5. 水口由介、永井久也、北野博亮、岩田剛、非火災室における機械排煙時の排煙性状に関する研究、日本建築学会大会、学術講演梗概集、A-2、査読無し、福岡、2016、pp. 361-362
6. 水口由介、永井久也、北野博亮、岩田剛、狭小空間における機械排煙時の排煙性状に関する研究、空気調和衛生工学会中部支部学術研究発表会、第 17 号、査読無し、名古屋、2016、pp. 55-58
7. 水口由介、永井久也、北野博亮、岩田剛、初期火災時の空間内の煙層下端位置の決定法に関する検討、日本建築学会東海支部研究報告集、第 54 号、査読無し、名古屋、2016、pp. 309-312
8. 水口由介、永井久也、北野博亮、岩田剛、大規模建築空間における初期火災性状の数値解析、その1. 圧縮性乱流モデルと簡易圧縮性モデルの比較、日本建築学会大会、学術講演梗概集、A-2、査読無し、神奈川、2015、pp. 311-312

〔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〕

ホームページ等無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永井 久也 (NAGAI HISAYA)

三重大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号： 40283402

(2) 研究分担者

北野 博亮 (KITANO HIROAKI)

三重大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号： 80293801