

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360256

研究課題名(和文)次世代煙流動ゾーンモデルの開発と利用基盤構築に関する研究

研究課題名(英文)A study on next generation zone smoke transport model and basis of practical usage

研究代表者

原田 和典 (Harada, Kazunori)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90198911

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,700,000円、(間接経費) 4,710,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、大規模建築物における火災拡大と避難行動の予測モデルを改良し、避難計画および消防活動計画に利用可能なプログラム開発を行うことを目標とした。多様な火災性状に対応した煙流動予測モデルの提案のため煙流動模型実験を行い、水平開口に生じる二方向流れの発生条件と流量を定式化した。また、壁際で可燃物の燃焼が加速する問題に対してはウレタンブロックの燃焼実験を行い、壁からの熱フィードバック効果を検討した。煙による視野閉塞と照度低下に関しては白煙による散乱光測光実験を行ない、作業面切断公式を拡張する方法を検討した。既存の二層ゾーン煙流動モデルの改良と並行して、これらのモデルの組み込みを行っている。

研究成果の概要(英文)：This study aims at improvement of the prediction methods of fire and smoke spread in buildings in connection with evacuation of occupants and activity of fire-fighters. To include wide range of fire and smoke phenomena, model scale experiments were carried out on smoke movement through horizontal ceiling vent. The onset condition of bi-directional flow was formulated. In the bi-directional regime, experimental formula was proposed for mass flow rates of air and smoke. To simulate the burning behavior of combustibles in a room, polyurethane block was burnt adjacent to wall surfaces, where they receive thermal feedback from walls. As to the sight blockage and decrease of floor luminance, the behavior of light scattering by smoke particles were measured and formulated. While the zone model is being improved, these newly developed sub-models are being implemented so that the prediction could be more realistic.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学 建築設備・環境

キーワード：煙流動 ゾーンモデル 流れ性状 燃焼モデル 散乱光

1. 研究開始当初の背景

建築物の火災安全設計においては、避難計画と消防活動戦略を立てて、安全区画（廊下）から階段を経て外部に至る避難経路や、防災センターから非常用エレベータや階段を経て火点に向かうための消防隊進入経路の計画が行われる。設計が妥当であるかどうかを定量的に判断するためには、火災性状予測に基づいて、避難計画と消防活動計画のストーリーが無理なく成立するかどうかを検証することになる。

そのための法的枠組みは、2000年の建築基準法で規定された避難安全検証法や2009年の消防法における消防活動拠点の技術基準等で規範的な方法が導入され、実務に供されている。そこでは、設計火源（建物の使い方により予期される可燃物の燃焼性状）を想定して、燃焼領域と煙の拡大を定量的に予測し、避難および消防活動上の支障の有無を判断している。

しかしながら、建築物の超・超高層化や大平面化を考えると、従来の規範的な方法をすべての建築物に適用することは技術的に妥当ではない。例えば、超・超高層ビルでは、全館の避難者を同時に受け入れるだけの階段数が足りないこともあって、全館避難に要する時間が長くなる。避難安全上の課題は、単に時間だけではなく、避難距離の問題もある。最終的に屋外に達するまでの距離が長くなると、健常者であっても自力での歩行避難には疲労と精神的圧迫を伴う。加えて、身障者・高齢者の人命安全性も考えると、屋外まで逃げるのが合理的でない場合も生じている。このため、中間避難階の明示的な設計やエレベータ利用避難が提案されつつある。

このような状況を踏まえると、非出火階からの避難中あるいは一時避難場所での籠城中に、出火室近傍では火災が成長してフラッシュオーバーが発生する可能性がある。従って、建物の一部で盛期火災が発生した状態での避難安全性を考える必要がある。しかし、現状の煙流動予測モデルは、基本的には初期火災を対象としているため、超・超高層ビルで想定される火災シナリオに十分には対応できない可能性がある。また、大規模ショッピングセンターや高機能ワークスペースに見られるように、平面的に広い空間では水平方向に煙が拡がり易い。そのため、煙に暴露される人数が多くなり、避難行動は複雑化する。避難者による出口の探索と選択が正しく行われるか、煙層の下を安全に歩行できるか、といった懸念が生じる。これに関しては、天井下に薄く広がった時の煙層の成層安定性と、煙層存在時の視野における避難出口の認識性、避難経路での歩行安全性が問題になる。

薄く広がった煙層の安定限界については、天井への熱損失、壁（特に冬期の窓ガラスのような低温部）への衝突による失速、流路の曲がり部分における空気との混合等の現象が懸念される。避難行動の安全性に関しては、

煙層粒子の光学濃度と出口の見え方との関係や床面照度との関係に基づいて、避難口誘導灯と非常用照明の設計を行う必要がある。

2. 研究の目的

現状の建築物の火災安全設計では、出火室および出火階からの在館者の避難経路と、出火階への消防隊の進入経路の安全チェックを階ごとに行うのが通常の方法である。いわゆる普通の中高層のビルであれば、現状の方法でそれなりの安全性を確保することができ、避難安全検証法などの簡易な設計式が設計現場では広く使われている。しかし、近年の建物の超・超高層化や平面大空間化を考えると、中高層ビルと同じ方法で火災安全設計を行うのは妥当でなく、建築物全体を考慮した火災拡大と煙流動の予測に基づく必要がある。

本研究では、大規模建築物の火災（延焼および煙）の進展と避難行動の予測方法を開発し避難計画および消防活動計画の指針に供することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、煙流動予測のためのゾーンモデルを改良し、近年の建築空間の大規模化に対応する煙流動予測モデルを提案することが目的である。そのサブテーマは、下記から構成される。

- 1) 多様な火災性状に対応した煙流動予測モデルの提案
- 2) 大空間における出口選択と歩行安全性の評価モデル
- 3) 避難行動予測と煙流動予測の統合モデルへの組み込み

4. 研究成果

- 1) 多様な火災性状に対応した煙流動予測モデルの提案

既存の二層ゾーン、多層ゾーンモデルの問題点を整理した上で、注目すべき物理現象について排煙口形状を考慮した排気効率の導入、排煙ファンの耐熱性と作動継続性の判定、ウォールブルーム（上昇気流）による煙層の乱れ等について情報収集を行った。

そのうち、天井排煙口のような水平開口の流れについては、模型実験を行い単純な一方向流が成立しなくなる限界条件の定式化を行った。測定結果の一例を図1に示す。この条件では、排煙口の右半分から煙が流出するが、左半分からは上部から煙が侵入し、煙と混合して煙の体積を増やす状況が発生している。このような二方向が生じる限界は、開口に加わる圧力差と煙層浮力との比により表せることを示し、実験結果から閾値を求めている。さらに、二方向流が生じる範囲については、外部への煙の排出流量と外部から侵入する空気の流量を求めるための実験式を提案した。

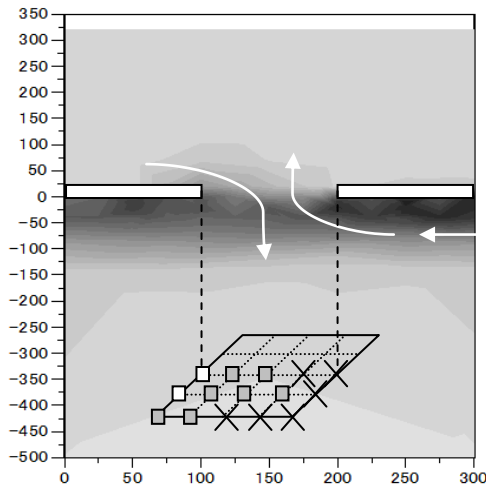


図 1 水平開口における煙と空気の二方向流発生時の温度分布

一方、煙流動予測の与条件となる燃焼性状に関しては、多くの課題が残されている。出火室内の燃え拡がりの速さは、可燃物の燃焼特性だけでなく、燃焼する時の室内温度、酸素濃度などの環境条件に左右される。また、壁近傍での燃焼は、周囲に壁が無い自由空間での燃焼よりも加速することが定性的には知られている。

本研究では、壁からの放射熱のフィードバックを受けて燃焼が加速する現象を予測するため、ポリウレタン製の立方体（以下、ウレタンブロック）を様々な条件で燃焼させて燃焼速度の時間的変化を測定した。実験の状況を図 2 に示す。壁との離隔距離を変化させた一連の実験結果から、壁との離隔距離が燃焼物の小径の 2 倍以下の時は、壁面からの放射熱のフィードバックにより燃焼が激しくなる効果が確認された。また、離隔距離が 10～30 mm のように小さい時には、壁面と燃焼物の間に十分な空気が流入せず、燃焼速度は自由空間とほぼ同じになることを明らかにした。



図 2 室の隅角部近傍におけるウレタンブロックの燃焼性状

出火室内の可燃物の燃え拡がりやフラッシュオーバーの発生は避難安全、消火活動、物損防止等に大きな影響がある。これを設計

用シナリオとして構築するため、既往の実大スケールおよび模型スケールの区画火災実験データを文献から収集し、図 3 に示すフラッシュオーバー発生限界発熱速度の簡易予測式を構築した。

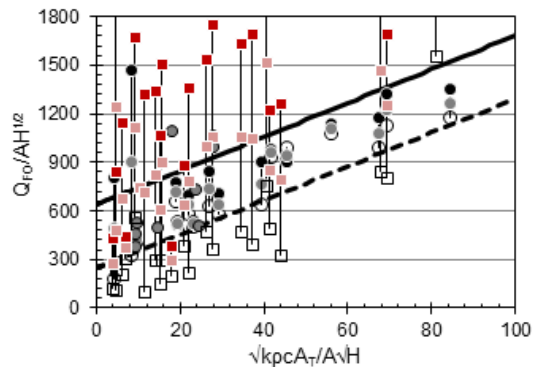


図 3 フラッシュオーバー限界発熱速度の簡易予測式（実線：実験データの平均，破線：実験データの下限）

2) 大空間における出口選択と歩行安全性の評価モデル

大空間での避難と救助・消火活動では、煙層の下を避難者あるいは緊急要員が歩くことが想定される。このような状況での視野輝度分布は経路発見の容易さ、床面照度は歩行の容易さに直結する。黒煙が空間内に存在する盛期火災時では、視野輝度分布や床面照度は既往研究のモデルを適用することができるが、くん焼時や初期火災時に発生する白煙に対しては、散乱光予測において不十分な点が残されている。

そこで煙の光学的濃度・厚みを変化させ内装反射のない模型空間の光源下に充填させ、測光実験を実施した。図 4 に実験状況を示す。

実験と並行して、ゾーンモデルで計算される煙の物理的性質（温度、ガス濃度、減光係数）を入力条件に用いて煙層内粒子による散乱を考慮した相互反射連立方程式により床面照度を求める方法を考察した。



図 4 白煙による散乱光測定の実況

3) 避難行動予測と煙流動予測の統合モデルへの組み込み

エレベータ避難予測コードの調査, ポテンシャル法による避難モデルの調査などの基礎的作業を行った。モデルの統合化に関しては、その前提として多様な火災性状をカバーするため、数値的安定性のあるアルゴリズムが必要となる。特に、さらに、フラッシュオーバーに至る直前で、火源の燃焼が激しくなった状態では、既存の二層ゾーンモデルの数値解法では数値的に不安定となることが知られている。

そのため、インプリシット差分を導入して反復法により各時刻での物理量の収支を厳格に満たした上で計算を進めていく方法を検討した。その結果、強い火災プルーフに対して生じやすかった数値的不安定が除去されることを示した。

この結果を踏まえて、火災初期からフラッシュオーバーを経て盛期火災、さらには周辺の室への延焼拡大の予測と、それに呼応した避難者、緊急対応要因、救助隊、消防隊の活動モデルとの統合を継続して行っている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

- ① Junghoon Ji, Kazuhiko Ido, Kazunori Harada, Yoshifumi Ohmiya, Masaaki Noaki, “An Experimental Study on Fire Spread over Polyurethane Block Receiving Heat Feedback from Adjacent Walls”, *Procedia Engineering*, 62, pp. 283-291, 2013, DOI:10.1016/j.proeng.2013.08.066
- ② Sungchan Lee, Kazunori Harada, “A Simplified formula for Occurrence of Flashover and Corresponding Heat Release Rate”, *Procedia Engineering*, 62, pp. 292-300, 2013 DOI:10.1016/j.proeng.2013.08.067
- ③ Yuki Akizuki, Naoya Hara, Kazunori Harada, Chunguang Lin, “Scattering Intensity of Floor Illuminance and Surface Luminance of Smoldering Smoke Layer”, *Procedia Engineering*, 62, pp. 554-563, 2013 DOI:10.1016/j.proeng.2013.08.100
- ④ Yuki Akizuki, Takeyoshi Tanaka, “Prediction Model for Target Luminance in Fire Smoke by Taking into Consideration the Adhesion of Smoke Particles Original Research Article”, *Procedia Engineering*, 62, pp. 483-492, 2013 doi: 10.1016/j.proeng.2013.08.091

[学会発表] (計43件)

- ① 李成璨, 原田和典, 「二層ゾーンモデルによるフラッシュオーバー限界発熱速度の予測と簡易式の提案」, 第13回近畿環境工学シンポジウム, pp.1-8, 日本建築学

会近畿支部環境工学部会, 2011年10月31日

- ② Junghoon Ji, Kazuhiko Ido, Kazunori Harada, Yoshifumi Ohmiya, Masaaki Noaki, “An Experimental Study on Fire Spread over Polyurethane Block Receiving Heat Feedback from Adjacent Walls”, The 9th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Oct., 2012
- ③ Sungchan Lee, Kazunori Harada, “A Simplified formula for Occurrence of Flashover and Corresponding Heat Release Rate”, The 9th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Oct., 2012
- ④ Yuki Akizuki, Naoya Hara, Kazunori Harada, Chunguang Lin, “Scattering Intensity of Floor Illuminance and Surface Luminance of Smoldering Smoke Layer”, The 9th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Oct., 2012
- ⑤ Yuki Akizuki, Takeyoshi Tanaka, “Prediction Model for Target Luminance in Fire Smoke by Taking into Consideration the Adhesion of Smoke Particles”, The 9th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Oct., 2012
- ⑥ Junghoon Ji, Kazuhiko Ido, Kazunori Harada, Yoshifumi Ohmiya, Masaaki Noaki, “A simple model for burning of combustible items close to a wall and corner of wall”, 9th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia, Gwang-Ju, Korea, Oct., 2012
- ⑦ Sungchan Lee, Kazunori Harada, “A Simple Formula for Room Flashover Possibility”, 9th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia, Gwang-Ju, Korea, Oct., 2012
- ⑧ Yuki Akizuki, Naoya Hara, and Takeyoshi Tanaka, Simplified calculating Model of Floor Illuminance in Fire Smoke, Proceedings of 5th International Building physics Conference, 2012
- ⑨ 宮本拓幸, 原田和典, 「微小な圧力差における水平開口の流れ性状の測定」, 平成24年度日本火災学会研究発表会概要集, pp. 60-61, 2012年5月21日
- ⑩ 林春光, 秋月有紀, 原直也, 原田和典, 「模型実験における煙層下の床面照度測定」, 平成24年度日本火災学会研究発表会概要集, pp. 62-63, 2012年5月21日
- ⑪ 李成璨, 原田和典, 「室のフラッシュオーバー発生条件の相関式の提案」, 平成24

- 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp. 106-107, 2012年5月21日
- ⑫ 池正熏, 井戸和彦, 原田和典, 大宮喜文, 野秋政希, 「周壁からの熱フィードバックを考慮した立体可燃物の燃焼性状に関する研究」, 平成24年度日本火災学会研究発表会概要集, pp. 296-297, 2012年5月22日
- ⑬ 林春光, 秋月有紀, 原直也, 原田和典, 「模型実験による煙層下の床面照度測定」, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第52号・環境系, pp. 45-48, 日本建築学会近畿支部, 2012年6月16日
- ⑭ 李成瑛, 原田和典, 「フラッシュオーバー限界発熱速度の予測式と既往の実験データとの比較」, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第52号・環境系, pp. 97-100, 日本建築学会近畿支部, 2012年6月16日
- ⑮ 池正熏, 井戸和彦, 原田和典, 大宮喜文, 野秋政希, 「周壁からの熱フィードバックを考慮した立体可燃物の燃焼性状に関する研究」日本建築学会近畿支部研究報告集, 第52号・環境系, pp. 209-212, 日本建築学会近畿支部, 2012年6月16日
- ⑯ 宮本拓幸, 原田和典, 「微小な圧力差における水平開口の流れ性状の測定(その2)」, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第52号・環境系, pp. 317-320, 日本建築学会近畿支部, 2012年6月16日
- ⑰ 林春光, 秋月有紀, 原直也, 原田和典, 「模型実験による煙層下の床面照度測定」, 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp. 119-120, 2012年9月14日
- ⑱ 宮本拓幸, 原田和典, 「微小な圧力差における水平開口の流れ性状の測定(その2)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp. 127-128, 2012年9月14日
- ⑲ 池正熏, 井戸和彦, 原田和典, 大宮喜文, 野秋政希, 「周壁からの熱フィードバックを考慮した立体可燃物の燃焼性状に関する研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp. 161-162, 2012年9月14日
- ⑳ 李成瑛, 原田和典, 「フラッシュオーバー発生条件の相関式と建物への適用」, 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp. 167-168, 2012年9月14日
- 21 井戸和彦, 原田和典, 松山賢, 野秋政希, 「点火位置を考慮した自由空間での発熱速度予測モデル」, 日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp. 377-378, 2012年9月14日
- 22 井戸和彦, 原田和典, 松山賢, 野秋政希, 「区画内におけるウレタンブロックの燃焼実験」, 日本火災学会研究発表会概要集, pp. 244-245, 2013年6月9日
- 23 土橋常登, 原田和典, 「コーンカロリメータ試験における試験体表面の対流熱伝達率の測定」, 日本火災学会研究発表会概要集, pp. 250-251, 2013年6月9日
- 24 秋月有紀, 林春光, 原田和典, 原直也, 「くん焼煙下の床面照度と煙層透過輝度」, 日本火災学会研究発表会概要集, pp. 276-277, 2013年6月9日
- 25 谷道雄太, 原田和典, 「二層ゾーン煙流動計算プログラムの数値安定性に関する研究-強いブルームの場合-」, 日本火災学会研究発表会概要集, pp. 162-163, 2013年6月8日
- 26 池正熏, 井戸和彦, 原田和典, 大宮喜文, 野秋政希, 「周壁からの熱フィードバックを考慮した立体可燃物の熱流束の予測に関する研究」, 日本火災学会研究発表会概要集, pp. 166-167, 2013年6月8日
- 27 林春光, 秋月有紀, 原直也, 原田和典, 「煙層がある空間内における天井照明による床面照度及び煙層透過輝度に関する研究」, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第53号・環境系, pp. 37-40, 日本建築学会近畿支部, 2013年6月16日
- 28 谷道雄太, 原田和典, 「二層ゾーン煙流動計算プログラムの数値安定性に関する考察」, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第53号・環境系, pp. 193-196, 日本建築学会近畿支部, 2013年6月16日
- 29 宮本拓幸, 原田和典, 「水平開口における二方向流の発生条件と質量流量の測定」, 「高強度コンクリート角柱の爆裂発生時の温度分布と空隙圧力の推定」, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第53号・環境系, pp. 297-300, 日本建築学会近畿支部, 2013年6月16日
- 30 池正熏, 原田和典, 大宮喜文, 野秋政希, 申易澈, 「壁と可燃物との離隔距離による熱フィードバックの変化が可燃物の燃焼に及ぼす影響に関する研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 防火, pp. 5-6, 2013年8月30日
- 31 土橋常登, 原田和典, 「コーンカロリメータ試験装置による合板の着火温度と熱慣性の測定」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 防火, pp. 7-8, 2013年8月30日
- 32 李ソンチャン, 原田和典, 「フラッシュオーバー限界発熱速度の予測式の比較考察」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 防火, pp. 223-224, 2013年8月30日
- 33 林春光, 秋月有紀, 原田和典, 原直也, 「簡易床面照度予測モデルのくん焼煙での比較」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 防火, pp. 233-234, 2013年8月30日
- 34 宮本拓幸, 原田和典, 「水平開口における二方向流の発生条件と質量流量の測定」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 防火, pp. 263-264, 2013年8月30日
- 35 谷道雄太, 原田和典, 「二層ゾーン煙流動計算プログラムの数値安定性に関する考

- 察 強いブルームの場合」, 日本建築学会
大会学術講演梗概集(北海道), 環境工学
II, pp. 575-576, 2013年8月30日
- 36 李ソンチャン, 原田和典, 「室のスケール
を考慮したフラッシュオーバー限界発熱
速度の予測式」, 日本火災学会研究発表会
概要集, pp. 54-55, 2014年5月27~28日
- 37 池正熏, 原田和典, 大宮喜文, 野秋政希,
申易澈, 「壁と可燃物の離隔距離による熱
フィードバックの変化が可燃物の燃焼に
及ぼす影響に関する研究」, 日本火災学会
研究発表会概要集, pp. 108-109, 2014年
5月27~28日
- 38 原直也, 秋月有紀, 原田和典, 「散乱媒質
の充満する室の間接照度の簡易計算法」,
日本火災学会研究発表会概要集,
pp. 276-277, 2014年5月27~28日
- 39 秋月有紀, 原直也, 関根綾子, 原田和典,
「白煙下照度予測における煙粒子の反射
率と衝突回数」, 日本火災学会研究発表会
概要集, pp. 278-279, 2014年5月27~28
日
- 40 原直也, 秋月有紀, 原田和典, 「散乱媒質
の充満する室の照度の簡易計算法」, 日本
建築学会近畿支部研究報告集, 第54号<
環境系>, pp. 9-12, 2014年6月22日
- 41 秋月有紀, 原直也, 関根綾子, 原田和典,
「白煙下での床面照度予測における煙粒
子反射率と粒子衝突回数」, 日本建築学会
近畿支部研究報告集, 第54号<環境系>,
pp. 29-32, 2014年6月22日
- 42 池正熏, 原田和典, 大宮喜文, 野秋政希,
申易澈, 「壁と可燃物との離隔距離による
熱フィードバックの変化が可燃物の燃焼
に及ぼす影響に関する研究(第2報)」,
日本建築学会近畿支部研究報告集, 第54
号<環境系>, pp. 141-144, 2014年6月22
日
- 43 李ソンチャン, 原田和典, 「フラッシュオ
ーバー 限界予測式の比較検討」, 日本建
築学会近畿支部研究報告集, 第54号<環
境系>, pp. 337-340, 2014年6月22日

〔図書〕(計1件)

- ① 北後明彦, 久次米真美子, 秋月有紀, 峯
岸良和, 山田茂, 中濱慎司, 第7章火災
時の人間の挙動と避難計画, 建築物の煙
制御計画指針第2版, pp. 288-319, 日本
建築学会, 2014

〔産業財産権〕

該当なし

〔その他〕

該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原田和典 (HARADA, Kazunori)
京都大学・工学研究科・教授

研究者番号: 90198911

(2) 研究分担者

原直也 (HARA, Naoya)
関西大学・環境都市工学部・准教授
研究者番号: 00330176

秋月有紀 (AKIZUKI, Yuki)
富山大学・人間発達科学部・准教授
研究者番号: 00378928

(3) 連携研究者

該当なし