

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03871

研究課題名（和文）異種スカラー源の同時推定及び接触回避経路探索アルゴリズムの構築と実証

研究課題名（英文）Simultaneous estimation of heterogeneous scalar sources and searching for contact-avoidance routes: algorithm construction and its validation

研究代表者

亀谷 幸憲 (Kametani, Yukinori)

明治大学・理工学部・専任講師

研究者番号：60759926

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、閉鎖空間内乱流場における複数スカラー源の同時推定並びに予測スカラー分布を用いた多目的経路最適化のためのフレームワークを構築した。期間内に実施した内容は、随伴解析による複数種スカラー源推定アルゴリズムの構築と数値解析での検証、予測分布を利用した、特定スカラー種を回避しながら別スカラーに迅速に到達する強化学習を用いた多目的経路最適化、並びに上記アルゴリズムの実験検証である。随伴解析による発生源推定ではRANSに基づく随伴解析にDNSを組み合わせ、経路最適化では報酬の正負を使い分けて多目的最適化を達成した。一方で実証に関して局所情報を取得する実験系の構築に留まった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では火災による被害縮小のため、消防士が局所計測情報から火点・ガス源ならびにその空間分布を予測し、ガスへの接触を最小限にして迅速に火点に到達する最適経路を提示するフレームワーク構築を実施した。随伴最適化による複数種スカラー源推定アルゴリズムは、コロナウイルスを排除しながら効果的に熱を輸送する空調設計や、血流で輸送された病原菌の幹部特定など展開が見込まれる。また、閉鎖空間に限らず大気や海中など開放空間への応用が期待できる。さらに、乱流輸送に関連する諸問題に対し有効な随伴最適化戦略が提示された。経路最適化は今後様々な場面で高度化・実用化が期待されるドローンを用いた極地活動への貢献が見込まれる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we constructed a framework for the simultaneous estimation of multiple scalar sources and multi-objective path optimization using predicted scalar distributions in a turbulent flow field within an enclosed space. The activities conducted during the period included: (1) constructing a multi-scalar source estimation algorithm using adjoint analysis and verifying it through numerical simulations, (2) employing multi-objective path optimization using reinforcement learning to quickly reach one scalar source while avoiding another specific scalar using the predicted distributions, and (3) experimental validation of the above algorithms. In the source estimation using adjoint analysis, DNS was combined with RANS-based adjoint analysis. For path optimization, we achieved multi-objective optimization by selectively using positive and negative rewards. The experimental validation, however, was limited to constructing an experimental system to obtain local information.

研究分野：流体工学

キーワード：スカラー源推定 乱流 随伴最適化 直接数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

火災現場や事故現場では、一酸化炭素や塩化水素等の有毒ガスが発生して対流によって輸送され、火災と共に消火活動及び救助活動の妨げとなる。救助隊や要救助者への被害拡大を防ぐためには、有毒ガスをできるだけ回避しながら迅速に火元の探索及び救助を行える経路選択が必要である。しかし、多くの場合、火元と有毒ガスの発生点は異なり、現場では限られた状況情報から経験に基づいて判断される傾向にある。

一般に、非線形性の強い乱流場において局所で計測されたスカラー濃度情報から、その発生位置を推定することは困難である。スカラー源推定は推定値と計測値の誤差を最小化する最適化問題として定義できる。数値解析手法の開発及びコンピュータの性能向上に伴い、これまで試行を重ねる順解析^[1]、最適化数理を用いた随伴解析^[2,3]やベイズ推定^[4]を利用した逆解析の手法によって発生源の推定手法が報告されている。

中でも物理現象の支配方程式に基づいて逆解析が行われる随伴解析最適化は、決定論的に最適解を得ることができ、さらに入力パラメータの数による計算コスト増加が小さいため、乱流場での諸問題に利用されている。Yamamoto et al. (2013) は直接数値シミュレーション(DNS)を用いて、随伴解析による並行平板間チャンネル乱流において抵抗低減と伝熱促進の非相似制御を達成した^[5]。また、Kametani et al. (2020) は、DNSと乱流モデルを用いたRANSを組み合わせることによって乱流熱対流場での伝熱面多自由度形状最適化アルゴリズムを構築し、数値解析と実験によって実証した^[6]。Cerizza et al. (2016) 及び Wang et al (2019) は、スカラーの発生源の推定値(場所及び強さ)を入力として、局所のスカラー濃度データと推定値の二乗誤差を最小化する非定常随伴最適化を行い、スカラー源を推定するアルゴリズムを構築し、壁乱流場で有効であることを報告した^[2,3]。

しかし、これらは単一種スカラーの濃度情報からその発生源の推定することを目的としており、熱と有毒ガスなど複数異種のスカラー(温度含む)の発生源の同時推定手法の開発例はなく、特定スカラーの接触回避と別のスカラー発生源到達を同時に実現する経路探索への展開例はない。

本研究では、随伴解析に基づいて、対流輸送された複数種スカラーの局所計測情報から発生源を同時推定するアルゴリズムを構築し、特定スカラーへの接触を回避しつつ発生源にたどり着く経路探索のフレームワークを開発する。また、温度と気体アルコールを異種スカラーとして、風洞実験により本アルゴリズムを実証する。

【参考文献】 [1] Mahar & Datta, *J. Water Resour. Plann. Manage* (1997). [2] D. Cerizza et al., *Flow Turb. Combust.* (2016). [3] Q. Wang et al., *J. Fluid Mech.* (2019). [4] Delle Monache et al., *J. Appl. Meteor. Climatol.* (2008). [5] Yamamoto et al. *J. Fluid Mech.* (2013). [6] Kametani et al., *J. Ther. Sci. Tech.* (2020).

2. 研究の目的

有毒ガスを回避しつつ迅速に火点へたどり着く最適経路探索手法開発を目指し、随伴解析に基づく複数種スカラー源の推定及び特定スカラーへの接触を最小化する目的スカラー源までの経路を探索するフレームワークを確立する。

3. 研究の方法

複雑形状閉鎖空間内における複数種のスカラー源推定及び、特定スカラーへの接触を回避する経路探索を目的とし、**随伴解析による複数種スカラー源推定及び最適経路探索アルゴリズムの構築**、**数値解析によるアルゴリズムの検証及びアルゴリズムの実験実証**に大別される。ここで、複雑形状流路内での複数種スカラー源推定のため、**についてはまず「単純形状流路」にて実施し、「複雑形状流路」に拡張する。**

随伴解析による複数種スカラー源推定・非接触経路探索アルゴリズムの構築

推定対象流れ場に配置された複数種のスカラーの一つを主スカラー、その他を副スカラーとする。それぞれの局所濃度情報から各スカラー源位置を推定し、最低限の副スカラー接触で主スカラー源へ到達する経路探索アルゴリズムを構築する。そのために、各スカラー発生源の予測位置を入力(x_s)、その結果生じる局所データと同位置計測データとの2乗誤差の和をコスト(e)とし、コストが最小となる入力を探る最適化問題を定義する。それぞれのスカラー輸送現象を支配する時間平均輸送方程式とコスト関数から随伴解析を行い、入力である各スカラー源予測位置 x_s を更新する。コスト関数(e)が収束するまで反復してスカラー源を推定する。また、この際得られる推定分布から副スカラーの空間分布との接触を避けるよう、主スカラー源への経路を決定する。

数値解析を用いたアルゴリズムの検証

構築されたアルゴリズムを、数値解析を用いて検証する。ここで、互いにパッシブで化学反応しないスカラーを仮定し、副スカラー種数を最大2とする。また、本来は局所濃度の計測データを随伴解析に用いるが、ここでは直接数値シミュレーションから代用デー

タを得る．1年目に，単純な矩形計算領域を対象とする随伴解析コード作成し，計算コスト抑制のため，低レイノルズ数の非正常流れ場においてアルゴリズムを検証する．その後，2年目に，より複雑な形状の閉鎖空間におけるアルゴリズム検証のため，任意計算領域形状を設定できるオープンソースコードである OpenFOAM への随伴解析アルゴリズムの移植を行い，1年目と同様の手順で検証を行う．

実験によるアルゴリズムの実証

副スカラーが1種の系を用いて，アルゴリズム実証実験を行う．ここで，主スカラーを温度，副スカラーを気化したエタノールとする．まず2年目に，単純形状空間である矩形形状の閉鎖空間を用意し，床面に碁盤状に配置された温度センサーとアルコールセンサーから床面付近の温度分布と濃度分布を得る計測系を構築する．任意の位置での温度・濃度計測データから随伴解析を実施し，スカラー源推定・回避経路探索アルゴリズムを実証する．3年目に，建物等の複雑形状空間を模倣したモデルを3Dプリンタで作成し，壁面に温度センサ・濃度センサを配置することで同様の実証実験を行う．

4. 研究成果

1. 異種スカラー源の同時推定について

センサーによる局所の濃度情報と予測値の2乗誤差を最小化する随伴最適化によってスカラー源の発生源を推定するアルゴリズムを構築した．長期対象時間区間での乱流場での随伴最適化を実施するため，統計場定常数値解析である RANS に基づく随伴解析アルゴリズムを構築した．ここで，順解析に直接数値シミュレーションを実施し，得られた統計量から渦拡散係数を計算して随伴解析に利用する．第1スカラーを熱・第2スカラーをガスと想定し，空気による対流輸送を想定して3次元数値解析による検証を行った(図1)．この際，それぞれのスカラー源を配置による結果を考察しており，センサーとの位置関係によって推定精度は大きく影響を受けることが確認できた．図2にその結果例を示す．分布はスカラー源予測分布であり極大値を取る位置がスカラー源位置となる．真の位置であるマーカーと予測分布の極大値が重なっており，推定が上手くいっていることを示している．

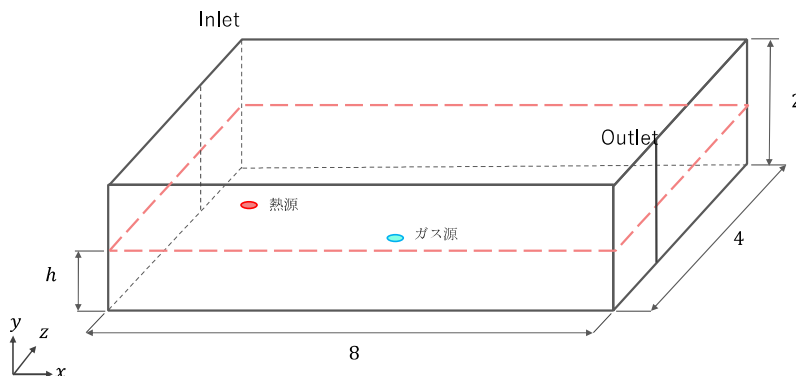


図1. 流れ場概略図

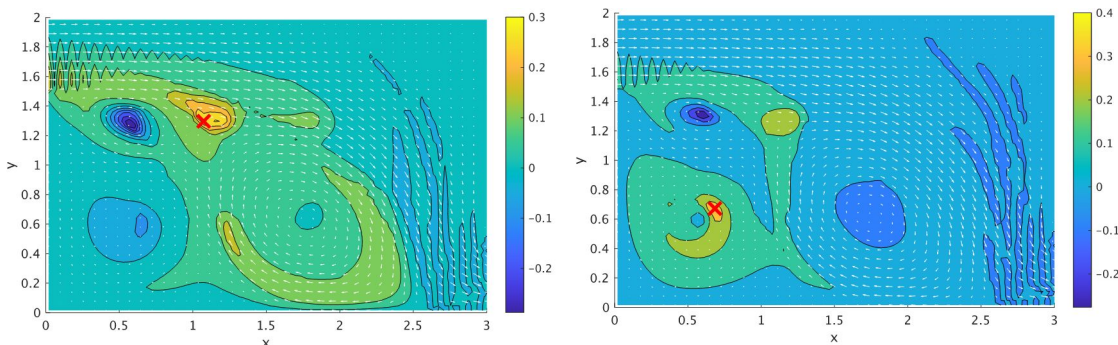


図2. 最尤推定の例．左) 熱源；右) ガス源．赤いマーカー，DNS で与えた真の位置．

2. 経路最適化について

予測されたスカラーの空間分布情報から，ガスへの接触を回避しながら熱源へ迅速に辿り着く多目的経路最適化アルゴリズムを構築した．経路最適化には強化学習を用い，Deep Q-Network (DQN)をアルゴリズムに組み込んだ．ここで，強化学習において熱接触に正，ガス接触に負の報酬を設定することで多目的最適化を実現している．図3に報酬の空間分布の一例を示す．また，経路最適化例を図4に示す．この時，経路は3次元的に最適化されており，火点へとガス濃度接触を回避しながら意図通り到達していることが

確認できた．一方で，DNS データの空間情報を全て与えて強化学習を行うには計算コストが高く，情報のフィルタリング等の低次元化が必要であることも確認できた．

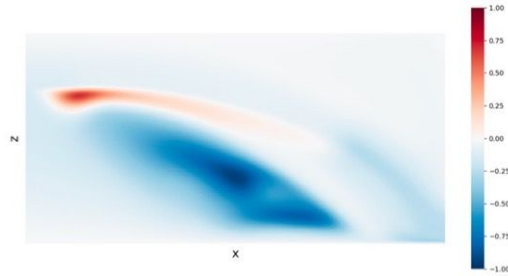


図 3．報酬の壁面上空間分布

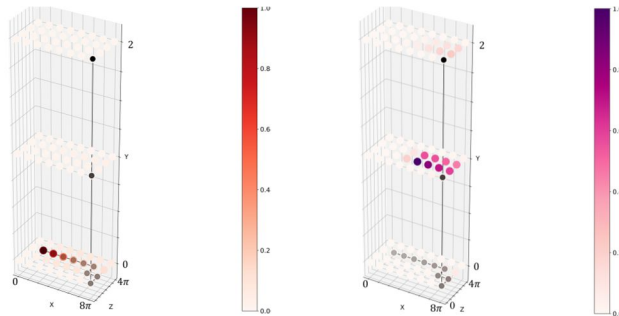


図 4．スカラー分布と最適経路例．左) 熱；右) ガス．

3. アルゴリズムの実験実証について

スカラー源推定並びに経路最適化の実施のため，図 1 の流れ場を再現する風洞装置を製作した．風洞装置を図 5 に示す．ここで，下壁面には格子状に配置された合計 6 ペアの温度センサ・二酸化酸素センサが配置されており，白熱電球・二酸化炭素のスプレー缶でそれぞれの真の発生源として対流場を作成した．また，速度場情報の取得には PIV を用意し，水平面内速度分布を取得できるようにした．対流中における局所温度計測，ガス濃度計測の結果を図 6 に示す．個々のセンサー位置における温度・濃度の時系列データが取得できていることが確認できる．また，同図に PIV に取得した速度分布を示す．平均流としては数値解析と同様の迂回流れが作成されていることがわかる．しかし，同条件を与えた直接シミュレーションとの比較により，温度・濃度・速度の空間分布には大きなずれが確認された．アルゴリズム実証のため，流れ場製作、計測精度にさらなる改善を要する．

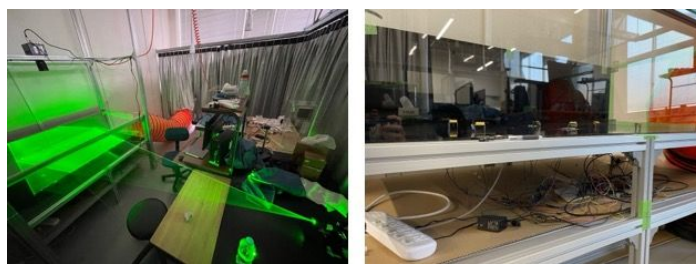


図 5．風洞装置

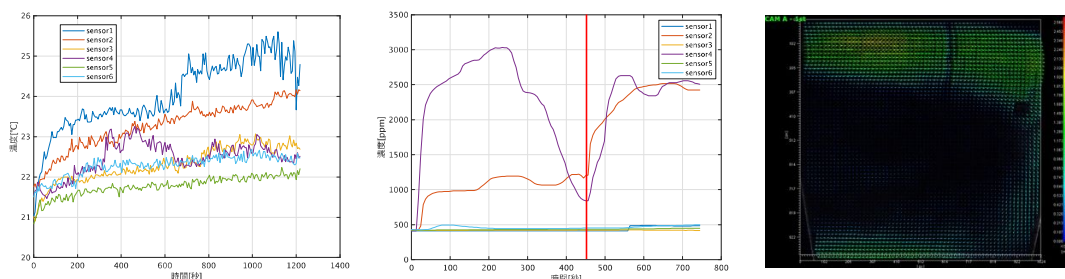


図 6．計測データ．左，局所温度；中央，局所二酸化炭素濃度；右，2D 面内平均速度．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 渡辺 稜冴, 亀谷 幸恵 |
| 2. 発表標題 随伴解析に基づく複雑流路内における異種スカラー源の同時推定 |
| 3. 学会等名 流体力学会年会2024 |
| 4. 発表年 2024年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|