

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2007～2008

課題番号：19206061

研究課題名(和文) リバースシミュレーションによるソース同定解析手法の開発

研究課題名(英文) Development of source identification method using inverse simulation

研究代表者

加藤 信介 (KATO SHINSUKE)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：00142240

研究成果の概要(和文)：

本研究は大規模災害や日常災害における汚染源位置と強度の特定と環境影響を明らかにし、その対策に貢献することを目的とし、建物及び市街地における流れ場の実用的な逆解析手法を開発する。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	25,700,000	7,710,000	33,410,000
2008年度	12,000,000	3,600,000	15,600,000
年度			
年度			
年度			
総計	37,700,000	11,310,000	49,010,000

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：リバースシミュレーション

1. 研究開始当初の背景

(1) 流れ場における逆解析

本研究は、結果(現在)から原因(過去)を推定する「逆解析(inverse analysis)」を流れ場に適用し、その実用手法を開発する。申請者らは極めて早い段階(1985年)から流れ場の逆解析手法の有用性を提案した。すなわち、室内の複雑な3次元の流れ場である室内気流の換気効率を効率良く評価するため、流れ場の時間逆転解析を利用する手法を提案した。

(2) 汚染源位置と強度の特定技術の必要性

一方、米国では9.11テロを受けここ数年、都市空間、建築空間における生物・化学的危

険物質の気中拡散に対する研究が急がれた。また世界的にはテロのみならず、鳥インフルエンザ、SARSなど感染症の爆発的な伝播を防止する技術の開発が求められている。これは発生位置、強度が特定された汚染源からの拡散性状の予測だけでなく、これが特定されていない場合に、速やかにこれを特定し対策を講じる技術の開発が急務とされる。

(3) 最近の流れ場の逆解析研究「リバースCFD」

この要請に対し、2005年、Q. Yan Chenは、汚染源の特定を、CFD(数値流体力学)の逆解析により行う手法を提案した。これはセンサーで検知した汚染物が時間逆転シミュレー

ションにより汚染発生源に戻ることを利用するもので、申請者らが 20 年前に提案したものを応用したものである。本申請では、汚染の移流、拡散のような時間発展現象を時間逆転シミュレーションにより発生源に至る過程を解析、特定する手法を以後「リバース CFD」と呼称する。

(4) 流れ場の逆解析の急所

この「リバース CFD」の成否は、時間逆転シミュレーションで生じる「負の拡散」に対する対策にかかっている。負の拡散を流体シミュレーションで確定論的に扱うことは熱力学第 2 法則に逆うことを意味する。申請者らの 20 年前の解決法は、安易に流れ、移流が卓越するとして負の拡散を 2 重に無視し、正の拡散としてモデリングするものであった。Q. Yan Chen の 2005 年の研究は、負拡散の効果をゼロとして無視し、CFD 解析に明示的な数値粘性を導入し安定化するものであった。本研究では、これに対して「負拡散」に対して一歩踏み込み、物理的な擾乱の「負拡散」は可能な限り保存し、CFD 解析に必然的に付随する数値的な擾乱の「負拡散」は、これを可能な限りダンプさせて負拡散を考慮しつつ、安定な解析を可能とする手法を開発し、確定論的シミュレーションを用いながら負拡散をある程度考慮する手法の開発を図る。

(5) 詳細かつ重い解析から必要十分な軽い解析

リバース CFD は、極めて詳細な情報を提供する。しかし、十分な空間解像がなされた 3 次元の非定常シミュレーションのため、莫大な計算量が必要となる。空間解像の程度を緩め計算量を減少させることも行われるが、甘い解像による打ち切り誤差はしばしば大きな精度と信頼性の低下を招く。本研究ではこの詳細かつ重い解析に加えて、原理的な精度と信頼性は同等程度に確保しつつ、より計算量が少なく済む解析法を新たに開発する。具体的には申請者らにより 2006 年に開発された「応答係数法 (レスポンスファクタ法)」による汚染応答解析に関し、新たにその逆解析手法を開発するものである。応答係数法は、CFD による詳細な流れ場解析に基づき予め空間の任意の点でパルス状の汚染発生が生じた場合の、空間各点 (特に汚染検出センサー位置) の汚染濃度応答を計算しておき、畳み込み積分により任意の汚染発生に対しその濃度応答を算出するものである。本研究では、逆にセンサー位置の濃度履歴から汚染発生の位置と強度を推定する手法を新たに開発する。

2. 研究の目的

研究課題は大きく 2 つある。一つは「リバース CFD」における「負の拡散」に対する対策研究であり、もう一つは「応答係数法」による汚染応答解析の逆解析手法の開発である。

(1) リバース CFD における負拡散の処理

負の拡散は、汚染質が低濃度領域から高濃度領域に輸送される現象である。過度の輸送は負値を招き、高濃度域では時間とともに濃度勾配が増大する。この負拡散が時間逆転進行に伴い物理的に非現実とならないようシミュレーションに制限をかけながらシミュレーションを実行する手法を開発し、その物理的妥当性を検証する。

(2) 応答係数法を用いた逆解析手法の開発

逆解析は、「汚染源の数を含めた位置・強度変化のパターン・発生開始時刻、継続時間」の組み合わせで応答係数の畳み込み積分で得られる濃度応答が、実際にセンサーで検知される濃度応答に最も適合するものすなわち最適値を探索して求める方法を検討する。実際のシミュレーションプログラムを作成し、この手法による予測の妥当性を検証する。

3. 研究の方法

(1) 逆解析の理論構築

「リバース CFD」における時間逆転シミュレーションの要点は、先にも述べたように負拡散の扱いにある。熱力学第 2 法則が示唆するように拡散現象はエントロピーの増大を伴う不可逆現象であり、通常の方法で確定論的に時間逆転シミュレーションを行うことは難しい。すなわち、何らかの確率論的アプローチもしくは近似モデリングの導入が必要となる。拡散現象は、大きなスケールから小さなスケールまで連続するスケールで生じている。大きなスケールで生じる拡散は、一般に寄与が小さく、局所性の高い小さなスケールで生じる拡散は大きな寄与をなす。すなわちこの小さなスケールで生じる大きな拡散は、解像が不十分であるなどの理由により一般に小さなスケールで比較的大きい数値的な擾乱を増幅させ、実際に生じている物理的な現象をマスクし、著しい場合にはリバース CFD を発散させてしまう。逆シミュレーションの過程でこの小さなスケールでの負の拡散が物理的なリアライザビリティを満たさなくなった時に、これを満たすよう小さなスケールでの負拡散効果を減衰させる制約を課すことが有効と考えられる。本研究では、この効果的な制約条件を見出し、その具体的な形を提示することを目標とする。

「応答係数法」における室内非定常濃度分布の計算法は申請者らの極めてオリジナルな

提案である。この手法に関する研究成果は公表されて日も浅い(2006年)が原理的な課題は解決されている。応答係数法による流れ場の汚染拡散場解析は、まず基礎となる流れ場を乱流の数値シミュレーションにより解析し、この流れ場を固定して、任意の地点でパルス状の汚染発生をなして、その濃度応答を室内各点で非定常拡散場解析により求め、実際の非定常拡散場は求められた応答係数の畳み込み積分により算出する。すなわち汚染発生の位置、強度などが特定されていれば、センサー位置での濃度応答は、この応答係数の畳み込み積分により容易に求められる。逆解析は、この逆を行うものであり、センサー位置での濃度応答から、汚染源の位置、強度、継続時間などを求めるものである。容易に知れることであるが、逆解析は有限のセンサー応答情報から、無限の自由度を持つ流れ場の中の汚染源の状況を求めるものである。どのようなセンサー応答情報であれば、逆解析における解の一意性や存在が保証されるかなどの基本的な問題に対する理論はない。現実的にはむしろ逆解析の解の一意性や存在とは無関係に、収束計算などの数値的な方法により逆解析の解すなわち汚染源の位置や強度などを探査することになる。本研究では、実際のセンサー位置で得られる濃度応答に最も適合する汚染源の位置や強度など汚染源情報を解析的に求める方法を採用する。

なおこの逆解析シミュレーションは、欧米ではテロ対策や鳥インフルエンザなど、空気感染の恐れのある感染症対策などに関する必須の技術として大きな関心を呼ぶものであり、その技術、学術成果の交流の意義はきわめて高い。

(2) 逆解析シミュレーションソフトの開発と実行

「リバーシ CFD」と「応答係数法」のそれぞれの手法に関してシミュレーション用のプログラムを開発する。リバーシ CFD は、通常の3次元非定常の拡散数値シミュレーションに関して、移流項と拡散項のそれぞれの符号をマイナスとすれば、直ちに時間逆転シミュレーションが可能となる。これに関しては既存のソフトを使用する。しかし、負の拡散による数値的不安定を防止するため、拡散スケールの解析と数値計算格子スケールなど小さいスケールの拡散をダンプさせるフィルターの作成と組み込みが必要となる。

応答係数法による非定常濃度場解析シミュレーションプログラムは既存のものがないため、新たに開発する。

「リバーシ CFD」と「応答係数法」による逆解析は、それぞれ室内といった閉鎖空間と建物周辺や屋外の流れ場の双方で実行し、その有効性を検討する。

4. 研究成果

(1) リバーシ CFD における負拡散の処理

負の拡散は、汚染質が低濃度領域から高濃度領域に輸送される現象である。過度の輸送は負値を招き、高濃度域では時間とともに濃度勾配が増大する。この負拡散が時間逆転進行に伴い物理的に非現実とならないようシミュレーションに制限をかける方法として、濃度が負になる領域が発生した場合、その負値をゼロキャンセルする計算アルゴリズムを組み込むことで、計算の安定性を確保した。

以下に本開発プログラムを用いたケーススタディを示す。このケーススタディは屋外の単建物周りにおいて汚染質が発生したことを想定している。

図1, 2は空間内のある点で汚染質を発生させ、その汚染質の拡散を時間を順方向にシミュレーションした結果である。図1は汚染質発生から1秒後、図2は汚染質発生から200秒後を示す。それぞれ、図中の赤の領域で汚染質濃度が高いことを示す。

図2の汚染質が拡散した状態から本研究で開発したリバーシ CFD を実行する。図3が汚染質発生から1秒後まで逆シミュレーションを行った結果である。図1の高濃度を示している部分と近い位置に濃度の高い位置がみられ、完全な一致ではないが、大まかな発生位置を同定できていると言える。

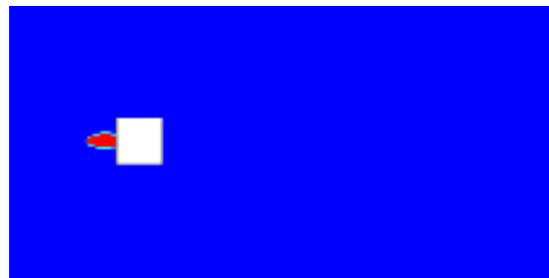


図1 汚染質の発生から1秒後まで順シミュレーションした結果

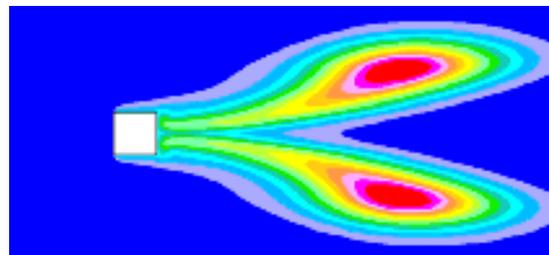


図2 汚染質の発生から200秒後まで順シミュレーションした結果

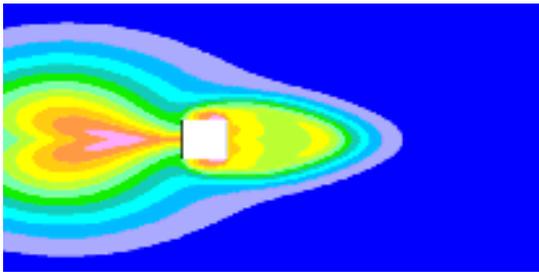


図3 汚染質の発生から1秒後までリバースシミュレーションした結果

このリバースCFDの計算アルゴリズムの詳細は後述する発表論文等を参照されたい。

(2) 応答係数法を用いた逆解析手法の開発

ここでは、CFDにより定常気流分布を計算し、その流れ場のCFDによる濃度計算により、汚染質発生点から観測点への応答係数を算出し、応答係数法に基づき観測点の濃度の畳み込み計算式を立てる。この濃度の計算式に重み付残差法を適用して、観測濃度と計算濃度の残差を最小にする汚染質発生量に関する連立方程式を定式化することで、観測濃度に最も適合する汚染源の位置や強度などの汚染源情報を解析的に求める。この連立方程式による発生量計算は畳み込み計算による濃度解析に対する逆解析である。

以下に本開発プログラムを用いたケーススタディを示す。このケーススタディは図4に示す室内において汚染質が発生したことを想定している。

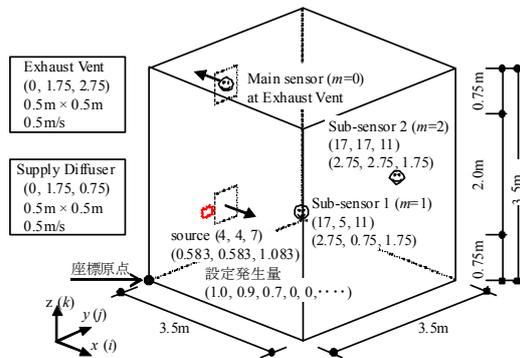


図4 室モデル

この室モデルの“source”の位置から汚染質が発生した時の、室モデル内の3つのセンサーの応答を本開発プログラムに入力すると、図5に示すように、空間内の残差分布が得られる。まずこの残差が最小となる位置が、“source”の位置として同定される。更には、図6に示すようにこの残差を最小にした汚染質情報が導かれ、その汚染質情報から畳み込み計算された汚染質濃度推移の計算値と、センサーにおける観測値の比較もできる。

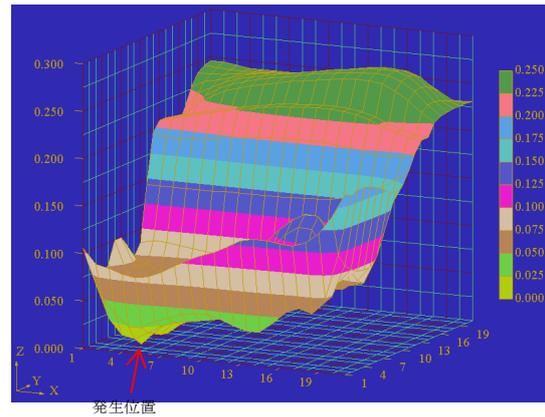


図5 空間の残差分布

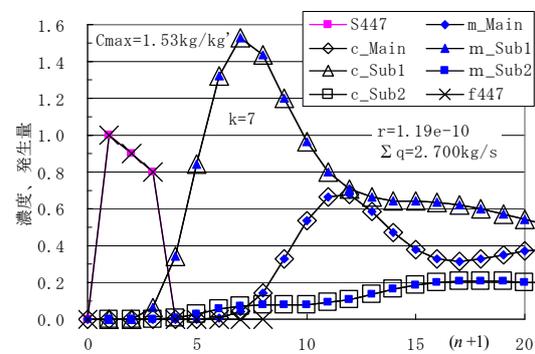


図6 同定された汚染質情報とセンサー応答の比較

研究は流れ場の確定論的な時間逆転進行シミュレーションという手法開発自身に大きな学術的な特色と独創性がある。特定されていない汚染の位置と強度を最小限のセンサーで検出するという課題は、都市・建築環境工学において未発展な領域であり、かつ、BCテロ対策や鳥インフルエンザやSARSなどの大規模感染の対策というその技術開発が急務となっている領域である。これはまた室内空調などにおけるセンシング技術の向上にも直接役立つものとなる。本研究の成果はテロや感染症などの災害脆弱性を緩和し、日本の都市・建築の安全予測技術の国際的優位性を確立するものとなる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① Mahmoud Bady, Shinsuke Kato, Hong Huang, Identification of Pollution

Sources Locations in Outdoor Environments Using Reverse Simulation Part(I):Basics of Reversed Time Marching Method, 生産研究 61 卷 1 号, pp.45-54 (2009 年) 査読無し

- ② 石田義洋、加藤信介、樋山恭助，センシング情報を用いた環境影響物質の発生源同定法：室内定常流れ場における応答係数法による同定方程式とその適用例，生産研究 61 卷 1 号, pp.30-38 (2009 年)，査読無し

[学会発表] (計 9 件)

- ① 石田義洋、加藤信介、樋山恭助，応答係数法による汚染質発生源同定法，第 24 回生研 TSPD シンポジウム講演論文集，2009 年 3 月 6 日，東京
- ② Huang Hong，Kato Shinsuke，Bady Mahmoud，Identification of Pollutant Sources in Urban Area Using Inverse CFD Modeling, USMCA2008, Seventh International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, 2008 年 10 月 22 日，北京，中国
- ③ M. Bady, S. Kato , H. Huang , Application of Inverse CFD Modeling to Identify Pollution Source Locations in Urban Areas, 日本建築学会大会学術講演梗概集，2008 年 9 月 19 日，広島
- ④ 石田義洋、加藤信介、樋山恭助，定常流れ場における非定常濃度応答計算法（その 1），汚染質の完全混合を仮定した室空間の濃度応答係数法，日本建築学会大会学術講演梗概集，2008 年 9 月 18 日，広島
- ⑤ 樋山恭助、加藤信介、石田義洋，RF 濃度計算法を用いた汚染質発生源同定解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，2008 年 9 月 18 日，広島
- ⑥ 石田義洋、加藤信介、樋山恭助，センシング情報を用いた応答係数法に基づく環境影響物質の発生源同定法(第 1 報)，定常流れ場における応答係数法の適用に関する研究，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，2008 年 9 月 17 日，滋賀
- ⑦ モハメド バダイ、加藤信介、黄弘，都市における汚染源特定のための役立つツールとしての逆解析，日本流体力学会年会，2008 年 9 月 6 日，兵庫
- ⑧ 樋山恭助、加藤信介、石田義洋，RF 濃度計算法を用いた健康危険物質の発生源同定解析，第 42 回空気調和・冷凍連合講演会，2008 年 4 月 23 日，東京
- ⑨ Mahmoud Bady, Shinsuke Kato, Hong

Huang , Identification of pollution sources locations in outdoor environments using reversed time marching method, ISWE3, The 3rd International Symposium on Wind Effects on Buildings and Urban Environment, 2008 年 3 月 5 日，東京

[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]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 信介 (KATO SHINSUKE)
東京大学・生産技術研究所・教授
研究者番号：00142240

(2) 研究分担者

大岡 龍三 (OOKA RYOZO)
東京大学・生産技術研究所・准教授
研究者番号：90251470

黄 弘 (Huang Hong)
東京大学・生産技術研究所・准教授
研究者番号：30376636

陳 宏 (Chen Hong)
華中科技大学・建築都市計画学院・教授
研究者番号：10401275