

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2017

課題番号：26709041

研究課題名(和文) 都市空間の微気象予測と分散センシングを融合した大気環境解析システムの開発

研究課題名(英文) Development of atmospheric environment analysis system combining
micro-meteorological prediction and distributed sensing in urban space

研究代表者

菊本 英紀(Kikumoto, Hideki)

東京大学・生産技術研究所・講師

研究者番号：80708082

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、計算流体力学に基づいた微気象予測と実環境計測データを活用し、都市の空気・温熱環境の精緻な解析手法に関する研究を行った。まず、計算流体力学による大気環境解析の精度検証および精度向上に関する検討を行った。また、大気環境観測の高空間解像度化に関する技術開発を行った。さらに数値予測と計測を統計モデルで融合することによって環境解析の高精度化および解析値の不確かさ評価を実現する手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we studied precise analysis methods of urban air / thermal environment using micro-meteorological prediction based on computational fluid dynamics and measurement data of actual environment. First, we investigated accuracy verification and accuracy improvement of atmospheric environment analysis by computational fluid dynamics. In addition, we have developed technology concerning atmospheric environment measurement at high spatial resolutions. Furthermore, we developed methods to realize high accuracy of environmental analysis and uncertainty evaluation of analysis values by combining numerical prediction and measurement with statistical model.

研究分野：都市・建築環境

キーワード：建築環境・設備 自然現象観測・予測 大気現象 流体工学 シミュレーション工学

1. 研究開始当初の背景

微気象と呼ばれる都市街区や建物スケールでの気象現象の解析には、計算流体力学 (CFD, Computational Fluid Dynamics) を用いた数値予測が有用であり、計算機資源の拡充とともに急速な進展を見せている。これまでも、CFD の中核である乱流モデルや数値スキームの開発など研究が多数実施されてきた。また、気流場だけでなく、汚染物質や熱の拡散現象などにも予測モデルが拡張されている。しかし、精緻な物理モデルとしての CFD 技術が成熟する一方で、実用段階における解析精度の向上には一定の限界が見え始めている。その要因は、CFD 解析の際の周辺情報 (境界条件やその他の入力条件) の精度にある。

例えば、都市内の気流を大きく左右する上空風には、経験的な風速プロファイルが設定されるがその精度や適用限界は明らかでない。さらに、空気や温熱環境の解析では汚染物質発生や人工排熱等の発生条件も経験値や簡易な推定値によって与えられており、これら入力情報の精度向上無くしては CFD を用いた微気象予測の精度向上は望めない。

一方で近年、様々な環境計測機器の高機能化、低価格化または小型化が進んでいる。今後、様々な環境観測器やその他の計器により様々なかつ大量な微気象データの収集が可能となるものと期待される。しかし、それらは観測値である以上、限られた地点および時間におけるデータでしかなく、計測されない地点や時間の値は何かしらの手法で補間されねばならない。また、様々な機器・状況で計測され、様々な観測誤差が混入したデータからは、合理的手法により観測誤差や異常値を取り除いたり、その不確かさを定量化したりする必要がある。

つまり数値予測では、モデル化された物理現象しか再現できず、また観測では計測された地点・時点での値しか得られない。CFD による微気象予測と観測値とを相互に利用することで物理モデルおよび不確かな入力値の精度を補う、あるいは、離散的な時間・空間点における観測値を CFD によって物理的に整合するよう補間することによって都市空間内の大気環境解析の更なる精度向上が期待できる。

2. 研究の目的

本研究は、計算流体力学に基づいた微気象予測と実環境計測データを活用し、数値予測におけるモデル化の限界および入力値の不確かさと実環境計測における計測点や時間の離散性を相互に補うことで、都市の空気・温熱環境の精緻な解析手法を開発することを目的とした。その結果、数値予測と実環境計測それぞれによる都市空間内の大気環境解析の精度向上を行うとともに、それらを融合した環境パラメータの新たな確率的予測手法や不確かさ評価手法の開発を行った。

3. 研究の方法

本研究では、主に下記の3つの段階において研究を行った。

CFD による大気環境解析の精度向上

大気環境の数値予測の精度を向上するためには、数値予測モデル自体の精度向上を行うとともに、数値予測モデルへの入力情報の精度を向上させる必要がある。そこで、(1) CFD の予測精度の向上と検証、および(2) 観測による CFD 入力情報の精度向上、を行った。

大気環境観測の高空間解像度化

近年の環境計測技術の進展に伴って、大気環境計測情報の高空間解像度化 (空間詳細化) が期待される。その手法のひとつとして移動計測が考えられるが、従来の固定点計測とは異なる技術的課題やデータ処理手法の検討が必要である。そこで、(3) 都市大気環境の高解像度観測手法の開発、および(4) 観測データの空間詳細化に関する検討、を行った。

数値予測と計測の融合解析手法の開発

大気環境の数値予測と計測にはそれぞれの長所と短所がある。したがって、それらを統合することによって、お互いの短所を克服し、また長所を強化することによってより精緻な環境解析が実現できる。それと同時に、数値予測や計測値の不確かさを評価することも可能となる。そこで(5) 数値予測と計測の融合解析手法の開発、によって CFD に代表される数値予測と環境計測値を統計モデルによって統合し、環境解析の精度向上および解析値の不確かさ評価を実現する手法を提案し、その有用性を検証した。

上記(1) ~ (5)に関するより具体的な成果は、次節において説明する。

4. 研究成果

(1) CFD の予測精度の向上と検証

高精度な微気象解析を実現するには、まずは CFD 解析モデルそれ自体の予測精度を向上し、また実験値との比較から検証を行う必要がある。本研究では、主に Large-eddy simulation (LES) と呼ばれる高精度な CFD 解析モデルを用い、都市空間における汚染物質拡散の予測システムを構築した。また、従来よりも飛躍的に高い空間解像度で LES を実施し、実験値との比較からその精度検証を行った。その結果、十分な計算格子の解像度を確保することで、LES においても平均濃度や濃度変動特性を十分な精度で再現できることを確認した (図 1)。またこの他にも LES の多くのベンチマークテストを実施し、都市空間の流れや拡散問題に LES を適用する際の適切な計算条件の整理を行った。

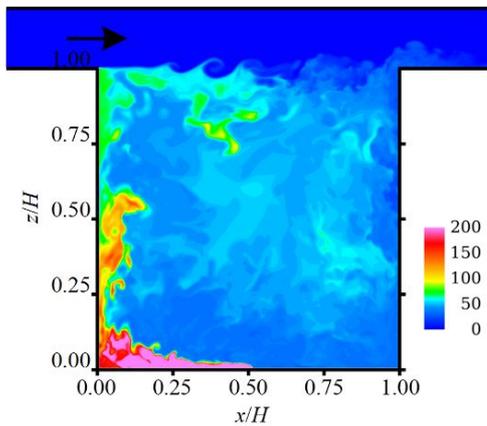


図1. 高解像度 LES により予測された都市空間モデル内における汚染物質濃度の瞬時値分布

(2) 観測による CFD 入力情報の精度向上

CFD 解析を実施する際には、解析モデルの様々なパラメータ設定とともに適切な境界条件を与えねばならず、その境界条件の精度が最終的な大気環境解析の精度に大きな影響を与える。

様々な必要とされる境界条件の中でも、対象空間へ接近する上空風の情報が流入境界条件として極めて重要である。経験的な風速プロファイルを流入境界として与えることが多いが、その精度はこれまで主に高風速の状況での観測データに基づいており、汚染物質や熱の拡散が問題となる低風速の状況においては検証がなされていなかった。そこで本研究では、ドップラーライダーと呼ばれるリモートセンシング技術を利用した上空風速観測装置を用い、東京上空の風速分布を長期間にわたって計測した(図2)。そのデータの統計的分析により、特に低風速においては従来の風速分布モデルの精度が低下することを定量的に明らかにした。また、風速や大気の熱的状态に応じて風速分布モデルのパラメータを調整する必要があることを明らかにした。

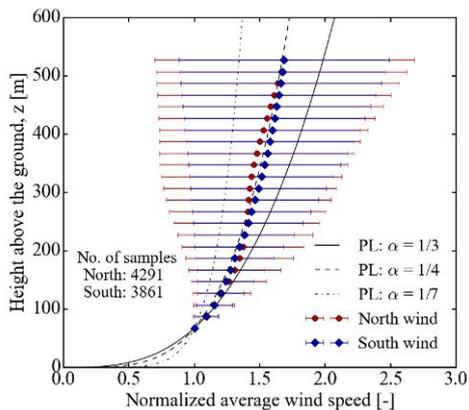


図2. 観測データから上空風速分布とその不確かさ(標準偏差)を評価した結果

(3) 都市大気環境の高解像度観測手法の開発
従来、気象あるいは大気環境の観測には、数 km から数十 km に一点程度の固定観測点での計測が行われてきた。しかし、都市の高密度化が進行する現在、その限られた位置での環境情報がどの程度代表的であるか明確でない。観測点の密度を向上させる方法として、移動計測が有用であると考えられるが、各位置のデータ数は固定点計測よりも減少してしまうため、得られたデータの不確かさも定量化する必要がある。

そこで本研究では、高い時間応答性をもつ環境計測器と GPS (Global Positioning System) ロガーを搭載した移動計測モジュールを制作した。その計測モジュールを自転車に搭載し、実際の高密度な市街地空間(東京都新宿区商業地域および渋谷区住宅地域)における気温および汚染物質(粒子状物質)濃度分布の高解像度計測を実施した(図3)。1 km 以内の空間範囲内においても気温や汚染物質濃度が大きく変化することを示すとともに、GPS による位置計測データおよび気温・汚染物質濃度の計測データの不確かさ解析手法の提示とその結果を示した。

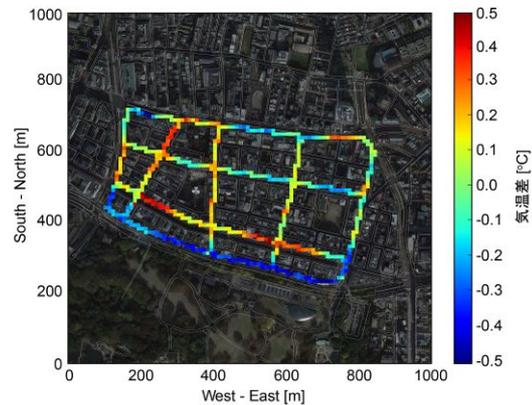


図3. 高密度な市街地での気温分布計測結果

(4) 観測データの空間詳細化に関する検討

移動計測データも依然として CFD など空間全体を解析対象とするモデルと比較すれば、空間解像度において劣っている。また、移動計測では、偶発的な要因の影響を受けやすく、計測値がランダムノイズで不必要にばらついてしまう可能性がある。

そこで本研究では、クリギングと呼ばれる統計的手法を用いて計測データの空間詳細化と不確かさの定量的評価を行う技術に関する検討を行った。通常型クリギングを適用することで、実測結果の特徴を保持しつつ、対象領域内の空間的自己相関構造を加味した、より実用的な空間分布を推定することができた(図4)。しかし、同じ領域内においても空間的自己相関が影響しない場所では、推定値の予測誤差分散が大きくなり、推定精度が低下してしまうことも示した。また、CFD により模擬計測データを作成し、統計的手法による空間詳細化技術の妥当性を評価した。

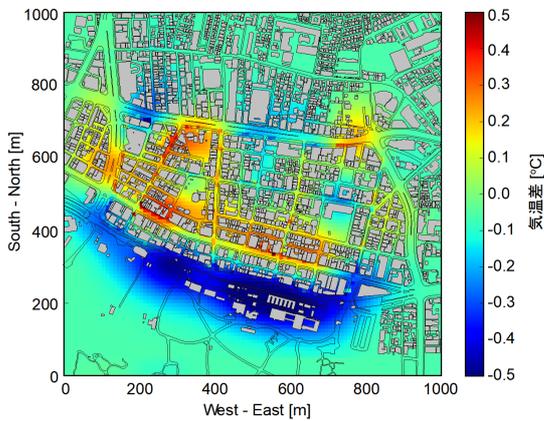


図4. 統計モデルにより空間詳細化を行った気温分布計測値

(5) 数値予測と計測の融合解析手法の開発

ここまでの研究では、主に数値予測や観測など個別手法やそれによって得られるデータの精度向上を行い、総合的に大気環境解析の精度もまた向上させる取り組みを行ってきた。本研究では、さらに数値予測と計測をより直接的に融合させ環境パラメータの解析精度を向上させる手法に関する研究も行った。より具体的には、数値予測と実測データをベイズ推定と呼ばれる統計的モデリングによって融合し、数値予測モデル内に現れるパラメータの確率的推定手法に関する検討を行った。この手法により、数値予測モデルの未知パラメータを同定するとともに、数値モデルによる予測結果の不確かさ評価も可能となった。

ここで開発した数値予測と計測の融合解析の応用例のひとつとして、汚染物質の発生源同定手法の開発を行った。汚染物質の拡散解析では、ある環境条件下において汚染物質の発生量を入力値として与えその濃度分布を予測するというのが一般的であるが、この入力値の精度そのものが予測結果の精度を大きく左右する。また、発生源の位置や強度に関する情報が全くないという状況もあり得る。そこで、CFDによる数値予測と限られた点数での濃度計測値からベイズ推定を用いた逆解析手法によって汚染物質の発生源を確率的に同定する手法を提案し、その妥当性検証を行った(図5)。

また、この融合解析手法は数値予測モデルと計測データを統合する極めて汎用的な方法論である。環境解析においても環境のパラメータを数値予測モデルと実計測データから逆解析するということは広く行われている。今後も本研究で得られた知見を活用し、大気環境予測に留まらず、様々な環境解析手法に応用しその有効性を検証していく予定である。

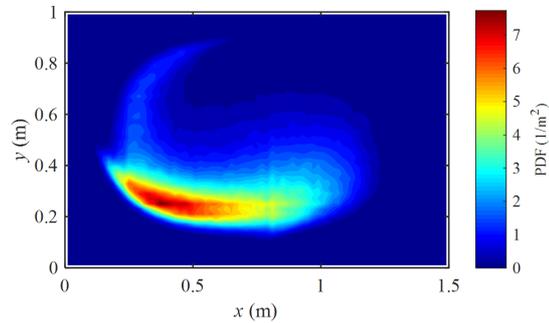


図5. 空気汚染物質の発生源位置を確率的に推定した例(解析領域中の発生源位置の事後確率密度分布)

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9件)

- 1) Hideki Kikumoto, Ryoza Ooka, Large-eddy simulation of pollutant dispersion in a cavity at fine grid resolutions, *Building and Environment*, 127, pp. 127-137, 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.11.005, 査読有
- 2) Wonjun Choi, Hideki Kikumoto, Ruchi Choudhary, Ryoza Ooka, Bayesian inference for thermal response test parameter estimation and uncertainty assessment, *Applied Energy*, 209, pp. 306-321, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.034, 査読有
- 3) Hiroki Yokoyama, Ryoza Ooka, Hideki Kikumoto, Study of mobile measurement for detailed temperature distribution in a high-density urban area in Tokyo, *Urban Climate*, 24, pp. 517-528, 2018, doi: 10.1016/j.uclim.2017.06.006, 査読有
- 4) 横山広樹, 大岡龍三, 菊本英紀, 気温計測に基づく移動計測手法の適用可能性に関する検討: 移動計測を用いた高密度市街地における大気環境の高解像度観測 その1, *日本建築学会環境系論文集*, 82(738), pp. 767-777, 2017.8, doi: 10.3130/aije.82.767, 査読有
- 5) 菊本英紀, 崔元準, 大岡龍三, ベイズ統計アプローチを用いた自然換気パラメータの推定, *日本建築学会環境系論文集*, 82(734), pp. 357-365, 2017.4, doi: 10.3130/aije.82.357, 査読有
- 6) Hideki Kikumoto, Ryoza Ooka, Hirofumi Sugawara, Jongyeon Lim, Observational study of power-law approximation of wind profiles within an urban boundary layer for various wind conditions, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 164, pp. 13-21, 2017.5, doi: 10.1016/j.jweia.2017.02.003, 査読有
- 7) 菊本英紀, 大岡龍三, 加藤信介, 反転流れ場におけるトレーサー拡散に基づく環境汚染物質の発生源同定, *日本建築学会環境系論文集*, 第81巻第725号, pp. 607-614, 2016.7,

〔学会発表〕(計 24 件)

- 1) 横山広樹, 大岡龍三, 菊本英紀, 移動計測による都市大気環境の高解像度観測 その 2 通常型クリギングによる気温と粒子状物質濃度の空間分布推定, 日本建築学会大会(中国), 2017
- 2) Hideki Kikumoto, Ryozo Ooka, Large-eddy simulation at high-spatial resolution of gaseous dispersion experiment in a cavity, IAQVEC 2016, 2016
- 3) Wonjun Choi, Hideki Kikumoto, Ruchi Choudhary, Ryozo Ooka, Estimation of parameters related to natural ventilation using Bayesian approach, IAQVEC 2016, 2016
- 4) 横山広樹他, 移動計測による都市大気環境の高解像度観測その 1 渋谷住宅地における粒子状物質濃度の分布, 日本建築学会大会(九州), 2016
- 5) Hiroki Yokoyama, Ryozo Ooka, Hideki Kikumoto, Study of mobile measurement for detailed temperature distribution in a high-density urban area in Tokyo, 4th IC2UHI, 2016
- 6) 菊本英紀, 崔元準, 大岡龍三, 加藤信介, 随伴濃度とベイズ推定を用いた 2 次元居室空間における環境汚染物質の発生源同定, 日本流体力学会年会 2016, 2016
- 7) Hideki Kikumoto, Ryozo Ooka, Study of power-law approximation of wind profile in urban boundary layer with Doppler lidar measurement in Tokyo, ICWE14, 2015

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

菊本 英紀 (KIKUMOTO, Hideki)
東京大学・生産技術研究所・講師
研究者番号 : 80708082