

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 9 月 6 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03408

研究課題名(和文) 数値解析・データ科学・現場観測を融合した局地気象解析のための新数理モデル構築

研究課題名(英文) Mathematical modeling for local wind fields based on numerical analysis and data-driven modeling

研究代表者

水藤 寛 (Suito, Hiroshi)

東北大学・材料科学高等研究所・教授

研究者番号：10302530

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：観測データを用いて数値計算結果を改善し、より信頼性の高い予測に結びつける試みは、気象学の分野で様々な形で行われてきている。その中でも、日本のように山がちで時空間的な変化の激しい気象現象を特徴とする地域において局地的な大気汚染や湖沼の水質改善に役立てるためには、短い時空間スケールでの解析が必要とされている。本研究では、そのような局地気象を解析するための数値シミュレーションとデータ駆動モデリングを組合せ、限られたデータからその地域の局地気象の特徴を把握する取組みを行った。データ駆動モデリングに関する部分については学術雑誌に投稿し、採録された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究計画では、これまで二国間交流事業を通して協力を進めてきたフィンランド国立環境研究所のグループとの共同研究として、同研究所が集中的に取得している湖沼周辺の詳細な風況時系列データを利用し、このデータに基づいて、統計モデルと数値シミュレーションを用いた局地気象モデルを構築することを本研究の目的とした。フィンランドと日本は湖沼の汚染などの水環境に関して同種の課題を有しており、このような国際協力に基づく研究体制も本研究の学術的意義である。また、その成果から得られる環境影響評価は、周辺住民の生活に直接的な影響をもたらし、環境改善にも繋がる社会的意義を有するものとなる。

研究成果の概要(英文)：This study presents a numerical simulation and a data-driven model of a local wind field over two small lakes in Jyväskylä, Finland. Five temporary monitoring stations observed wind speed/direction around the two lakes. In addition, an official meteorological station located 15 km north of the lakes is permanently available. Numerical simulations based on digital elevation model (DEM) and laser-scanned height data provides characteristics of the local wind field around the targeted lakes. Based on a statistical analysis for the spatio-temporal wind data, we built two regression models for estimating spatial distribution of local wind speed and directions based on the DEM and official-station data. We compared the predicted wind speeds/directions by the proposed model with the corresponding observation data and a numerical result for model validation. We found that the proposed model could effectively simulate heterogeneous local wind fields and considers uncertainty of estimates.

研究分野：応用数学

キーワード：局地気象 数値シミュレーション データ駆動モデリング

1. 研究開始当初の背景

観測データを用いて数値計算結果を改善し、より信頼性の高い予測に結びつける試みは、気象学の分野で様々な形で行われてきている。その中でも、日本のように山がちで時空間的な変化の激しい気象現象を特徴とする地域において局地的な大気汚染や湖沼の水質改善に役立てるためには、短い時空間スケールでの風況解析が必要とされている。

2. 研究の目的

前項に述べたような解析を行おうとすると、まずは解析とその評価に十分な観測データが必要になるわけだが、日本においてはまだそのような体勢にはない。アメダスシステムで提供されているような数 10km 程度の解像度以上のデータを得ようとするれば、新たに観測機器を設置せざるを得ず、多大な費用を要する。そこで本研究計画では、これまで日本学術振興会の二国間交流事業を通して協力を進めてきたフィンランド国立環境研究所のグループとの共同研究として、同研究所が集中的に取得している湖沼周辺の詳細な風況時系列データを利用することを計画した。このデータに基づいて、統計モデルと数値シミュレーションを用いた局地気象モデルを構築することを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

本研究で解析対象としたのは、フィンランド中部に位置する Palokkajarvi と Tuomiojarvi という二つの湖の周辺領域である。図 1 に、対象とした湖周辺の地図を示す。これらの湖では大きな河川の流出入がなく、風に駆動される流れが支配的となっており、水交換が活発ではないために水質汚染への対策が必要となる。そこで、湖水の流れを調べるための前提条件として、その上空の局所風況場を得ることが重要となっている。

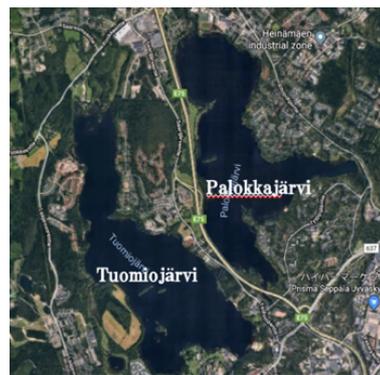


図 1 対象とする湖

本研究で使用したデータは 2 つの湖の周辺にフィンランド国立環境研究所のグループが設置した 6 カ所の詳細観測ステーション (図 2) と、そこから 10km ほど離れた位置にある Tikkakoski というフィンランド気象庁の公式観測ステーション (図 3) のデータである。これらを用いた数値シミュレーションを行

うと共に、対象とする二つの湖周辺の詳細観測ステーションと、そこから離れた公式観測ステーションの観測データに対する統計モデルを構築し、その有用性を検証することとした。

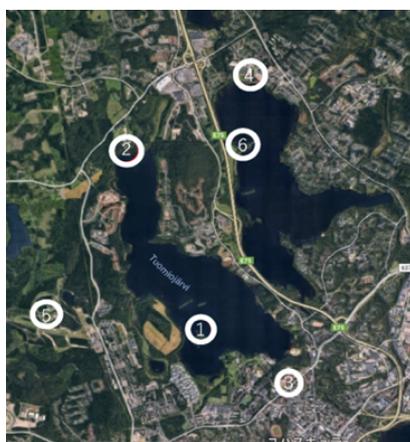


図 2 フィンランド環境研究所の観測ステーション

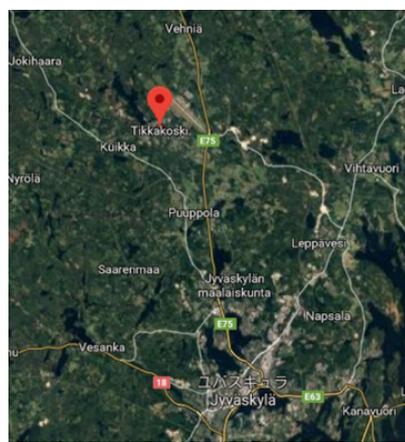


図 3 フィンランド気象庁の公式ステーション

4. 研究成果

4.1 樹高を考慮した風況解析

まず、局地的な風況の特徴を調べるため、NOAA などによって提供されている全球モデルのデータを用い、対象とする湖を含む小さい領域の境界条件をネスティング手法によって得た上で、地形や植生を考慮した風況計算を行った。なお、本研究で対象とする 10km 程度の領域において森林の樹木を 1 本ずつ取り扱うのは現実的ではない。そこで森林を多孔性媒質として扱い、その空隙率を主なパラメータとして計算モデルに取り入れた。そのために必要な樹高分布を得るために上空からのレーザースキャンデータを用いた。図 4 にレーザースキャンによって得られた地上高のデータを示す。この地域では土地利用のうち森林が占めている割合が高いため、このデータと数値地図の標高の差が、森林部分ということになる。標高図と樹高を重ねた形状を図 5 に示す。

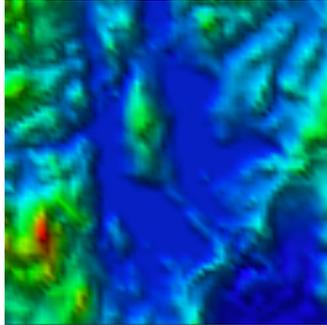


図 4 レーザースキャンデータ

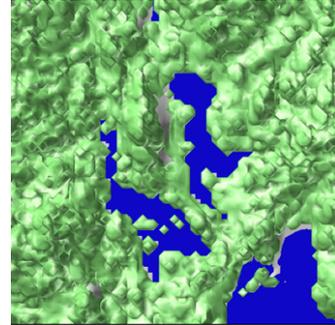


図 5 標高図に樹高を重ねた形状

森林領域の効果を多孔性媒質として取り入れるため、速度に比例する抵抗の項を Navier-Stokes 方程式に加えた。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{\text{Re}} \Delta \mathbf{u} - c_1 A (\mathbf{u} - \mathbf{u}_c) - \frac{1}{c_2} (0.5 - 0.5 \tanh(z - L(x, y))) \mathbf{u} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{u} は速度、 p は圧力、 t は時間、 Re は丘陵の高さを代表長さ、風速の最大値を代表速度としたレイノルズ数である。右辺第 3 項は、境界近くで観測データから得られる風向風速を速度 \mathbf{u}_c として与えるための項であり、右辺第 4 項は森林の効果を表す項である。 $L(x, y)$ はレーザースキャンデータから得られる地上高、 z は格子位置での海面高さである。 c_2 は森林内部での抵抗の大きさを表す。地形に沿ったシグマ座標系を構築し、コロケート格子上で有限差分法による数値シミュレーションを行った。

図 6 は鉛直断面における速度ベクトルを示しており、丘陵を越える風が丘陵部の森林によって減速していることが見て取れる。図 7 は湖の西側にある丘陵部付近に始点を置く流線を示しており、丘陵部を越えた風が、湖の上で滞留する様子を示している。これらの数値シミュレーション結果から、今回対象とした地域では、丘陵部の風下側に形成された不安定性が湖上領域全体に影響を及ぼしていることが観察された。

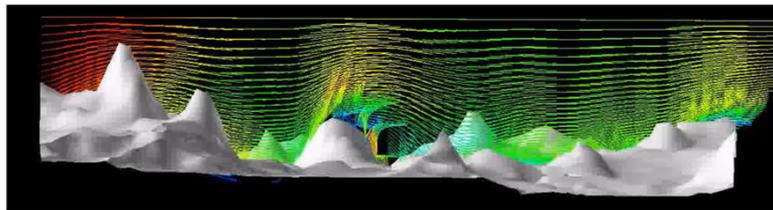


図 6 風速ベクトル

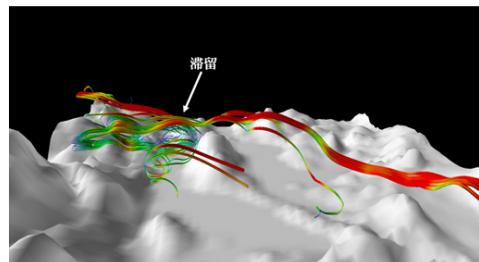


図 7 流線

4.2 局所風況場のデータ駆動モデリング

局所風況場を簡易に評価する方法として、データ駆動モデリングに着目し、同地域で計測した風向・風速データを対象に、データ駆動モデルの構築、および精度検証を行った。具体的には、2015、2016年にフィンランド国立環境研究所によって一時的に設置された5地点（Local Station, LS）の風向風速を、約15km離れたフィンランド気象庁による公式計測点（Official Station, OS）のデータのみで推定するためのモデリングを試みた。

4.2.1 風向・風速データの統計解析

風向・風速データの基本的な特性を把握するため、統計解析を実施した。解析に用いたデータはJyvaskylaの2つの湖（Palokkajarvi, Tuomiojarvi）周辺のLS:5地点（図8）で観測された風向・風速のデータ、および2つの湖から約15km北のOS: Tikkakoskiで計測された風向・風速のデータである。図9に位置関係を示す。

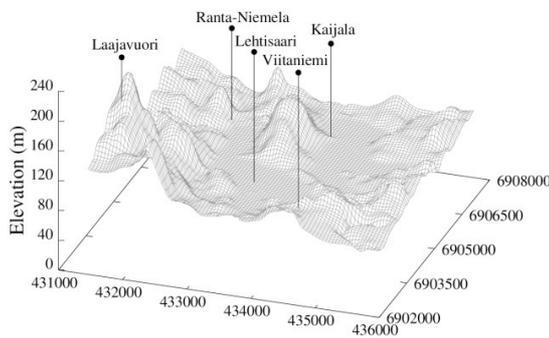


図8 湖周辺の計測地点LS

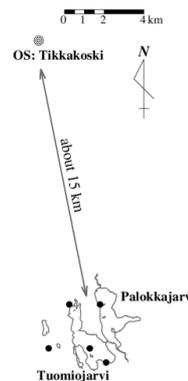


図9 計測点OSとの位置関係

データ解析の結果、風向と風速の相関は低く、独立してモデリングできることが明らかとなった。風速データに関しては、すべての観測点のデータで類似した自己相関性が確認され、風速の大きさにだけ着目してモデリングできることを確認した。また、風向に関しては、すべての観測点のデータが高い相関性を示したことから、単純な確率分布モデルでモデル化できることが明らかとなった。

4.2.2 風速のモデリング

統計解析の結果に基づいて、時刻 t の風速の調整係数 γ_t を次式で定義した。

$$\gamma_t^{\text{LS}-i} = v_t^{\text{LS}-i} / v_t^{\text{O}} \quad (2)$$

ここに、上付きのLSは湖周辺の計測データ（Local Station）、OはTikkakoskiの計測データ（Official Station）を表す。式(1)の調整係数を、標高 z (m) を変数とする回帰モデルで風速を評価することとした。回帰モデルの次数は、パラメータスタディにより決定した。構築したモデルを図10に示す。比較のため、0次、2次の回帰モデルも示している。このモデルを用いることで、OSの風速データと、標高のデータがあれば、任意地点の風速を推定することができる。

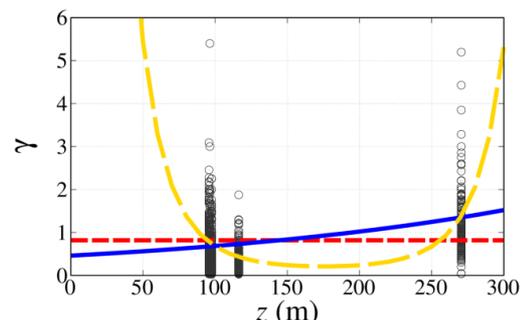


図10 風速の回帰モデル

4.2.3 風向のモデリング

統計解析の結果から、LS における風向 θ^{LS} は以下の確率モデルでモデル化することとした。

$$\theta_i^{LS} = \beta + 2\text{atan}\left\{\omega \tan(\theta_i^{OS} - \alpha)/2\right\} + \varepsilon_\theta \quad (3)$$

ここに、 β 、 ω 、 α はモデルパラメータであり、 ε_θ は以下のフォンミーゼス分布に従う誤差項である。

$$p(\theta | \mu, \kappa) = \frac{1}{2\pi I_0(\kappa)} \exp\{\kappa \cos(\theta - \mu)\} \quad (4)$$

ここに、 κ は分散を表す。式(3)のモデルパラメータは、最尤法によって決定した。最終的に推定されたモデルを図 11 に示す。このモデルを用いることで、OS の風向データがあれば、任意地点の風向を推定することができる。

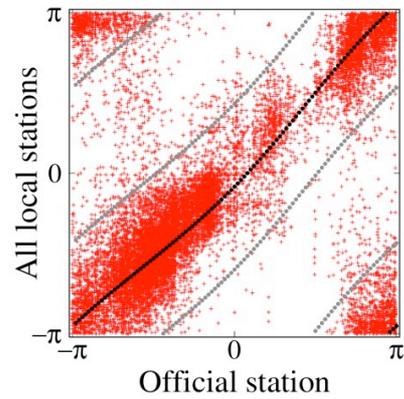


図 11 風向の回帰モデル

4.2.4 精度検証

風向・風速モデルは 2015 年に計測されたデータに基づいて構築したため、2016 年のデータをモデルの検証に利用した。図 12 は、LS-4 の Lehtisaari における風速・風向の予測結果と実測結果の比較を示している。構築したモデルは確率モデルであるため、予測結果として、68%信頼区間 (68%CL) と 95%信頼区間 (95%CL) を示している。図より、構築したモデルは実測データを精度よく説明できていることがわかる。

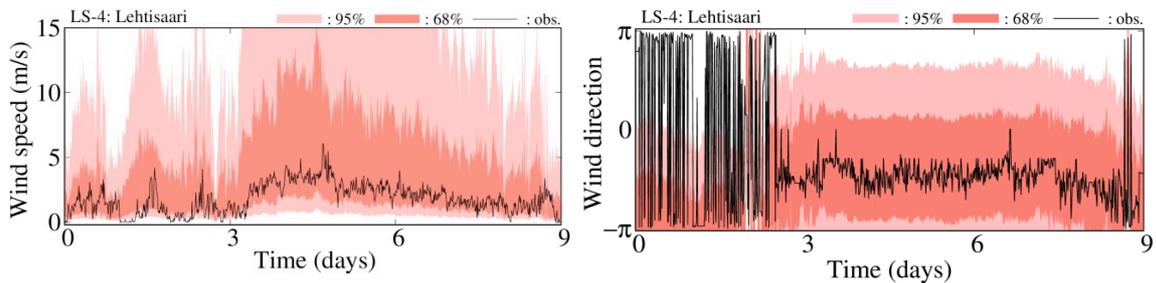


図 12 LS-4 における予測と実測の比較

発表論文

"Data-driven model of the local wind field over two small lakes in Jyväskylä, Finland", T. Shuku, J. Ropponen, J. Juntunen, H. Suito, *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 134, No. 18, DOI: 10.1007/s00703-021-00857-3, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shuku Takayuki, Ropponen Janne, Juntunen Janne, Suito Hiroshi	4. 巻 134
2. 論文標題 Data-driven model of the local wind field over two small lakes in Jyvaskyla, Finland	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Meteorology and Atmospheric Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00703-021-00857-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 珠玖隆行
2. 発表標題 Data-driven modeling for a local wind field around two small lakes in Jyvaskyla, Finland
3. 学会等名 The Second International Scientific Conference On Sustainable Agriculture And Environment (SAE2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 珠玖隆行
2. 発表標題 Data-driven modeling for wind fields over lakes
3. 学会等名 Geophysics Days 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019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
研究分担者	珠玖 隆行 (Shuku Takayuki) (70625053)	岡山大学・環境生命科学研究科・准教授 (15301)	

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			
フィンランド	Finnish Environment Institute			