

厚生労働科学研究費補助金（健康安全・危機管理対策総合研究事業）
公衆浴場等におけるレジオネラ発生防止及び衛生管理推進のための研究
研究代表者 泉山 信司 国立感染症研究所

レジオネラ属菌を含むエアロゾルの広域拡散シミュレーションとリスクエリア分析

研究分担者 大沢 飛智 北海道大学大学院工学研究院 助教

研究要旨

2023年に宮城県大崎市でレジオネラ症の集団感染事例が発生した。本事例では感染者のうち13名が発生源から半径3km圏内に住居や職場を有していたことから、レジオネラ属菌が広範囲へ拡散した可能性が示唆されている。本研究では、この事例を対象としてGIS（地理情報システム）を用いて構築した3D都市モデルに対してCFD（数値流体力学）解析を行い、レジオネラ属菌の広域拡散プロセスを定量的に評価することを目的とした。解析モデルには、紫外線Bによる不活化、相対湿度による生存率の変化、および粒子の沈降メカニズムを算入し、気象条件別の動的なシミュレーションを実施した。

解析の結果、感染リスクの空間分布は気象条件によって劇的に変動することが明らかとなった。日中の晴天時のみならず曇天時においても、雲を透過する紫外線Bの強い不活化効果により、浮遊する菌は地上へ到達する前に不活化され、地上付近のリスクエリアは大幅に縮小・消失した。一方で、紫外線B強度が著しく低下する雨天時には、空中での生存期間が延長され、風下に帯状のリスクエリアが残存する可能性が示された。さらに、日射のない夜間は紫外線Bによる不活化が消失し、生存が相対湿度にのみ依存することに加え、風速低下によって長距離拡散が抑制されるため、発生源近傍に高濃度の菌が滞留し、局所的に極めて高い曝露リスクを形成することが確認された。

本研究により、レジオネラ症の感染リスクの及ぶ範囲は、発生源の菌濃度のみならず、天候、時間帯、風系などの環境要因の相互作用によって、大きく変化することが示された。本研究で構築した手法は、潜在リスクマップを可視化することができ、今後は複雑な地形特性や都市の建物密集度がリスクエリアの形成に及ぼす影響の解明、および他都市事例の分析を実施していく。

A. 研究目的

レジオネラ属菌は、冷却塔や公衆浴場などの人工水系で増殖し、吸入されることで重度の肺炎（レジオネラ症）を引き起こす病原菌である。そのため、増殖リスクのある施

設は、公衆衛生上の厳格な規制のもとで管理されている。しかし、2023年6月から9月にかけて、宮城県大崎市の病院（A病院）に設置された冷却塔を発生源とするレジオネラ症の集団感染事例が発生した¹⁾。本事例では感染者のうち13名が発生源から半径

3km 圏内に住居や職場を有していたことから、レジオネラ属菌が想定以上に広範囲へ拡散した可能性が示唆されている。発生当時、A 病院の冷却塔水におけるレジオネラ属菌濃度は約 68,000,000 CFU/100mL に達しており、冷却塔の循環水に求められる安全基準 (100 CFU/100mL 未満) の約 68 万倍に相当していた。これほど高濃度のレジオネラ属菌を含むエアロゾルが屋外へ拡散したと考えられるが、その具体的な伝播メカニズムや大気中での生存特性、空間的な濃度分布については十分に解明されていない。

そこで本研究では、GIS (地理情報システム) により再現した大崎市の 3D モデルに対して、CFD (数値流体力学) 解析を行い、レジオネラ属菌の拡散プロセスを明らかにした。その際、紫外線 B や相対湿度によるレジオネラ属菌の不活化、および沈降メカニズムを計算モデルに反映させ、発生源から 5km 圏内における拡散範囲と濃度分布を定量的に評価した。

B. 研究方法

本研究では、3D で再現した対象都市を対象として、レジオネラ属菌を含むエアロゾルの CFD 解析を実施し、リスク分析を行った。以下に手順の詳細を示す。

(1) 対象都市の再現

対象都市の再現手法については既往研究²⁾で示しており、ここではその概要を簡潔に記す。

① 建物形状の取得

対象都市である大崎市では、建物形状を再現するために利用可能な無償の GIS データが十分ではないため、オープンソースで

利用可能な Open Street Map (OSM)³⁾で建物の平面形状を把握し、基盤地図情報より入手可能な地表面の標高座標である DTM⁴⁾と国際興業株式会社より有償で提供されている樹木や建物を含めた標高座標である DSM⁵⁾の差から建物高さを推定した。

② 建物形状の再現

求めた建物の形状 (平面形状、高さ) を基に R 言語⁶⁾を用いて、Energy Plus⁷⁾で利用可能な idf ファイルとして対象都市を 3D 化した。また、Google SketchUp⁸⁾を用いて、CFD 解析用ソフトである STREAM⁹⁾に反映させるための STL 形式に変換した。図 1 および図 2 がそれぞれのツールで作成した都市の 3D モデルである。

(2) 3D モデルによる CFD 解析

宮城県大崎市でレジオネラ症集団発生があった 2023 年 6 月から 8 月を対象に、当時の気象条件を再現し、レジオネラ属菌を高濃度を含む冷却塔からの噴霧を模擬した拡散シミュレーションを実施した。解析に際し、シミュレーション時の設定は以下のようにした。

① 風向の決定

CFD 解析において、風向風速の設定は重要な要素である。そこで、気象庁 (JMA) が提供する 6 月から 8 月にかけての大崎市の気象データを用いて、図 3 のように風配図を作成した。本研究では住民が活動中と想定される時間帯 (10:00~22:00 と仮定) に焦点を当て、さらに日中 (10:00~16:00) と夕方以降 (16:00~22:00) に分割した。どちらの時間においても南東から風が吹いており、海からの卓越風によるものと推測される。

図 3 に示すように、夕方以降は日中よりも風速が弱くなる傾向がみられた。

② 紫外線によるレジオネラ属菌濃度減衰効果

紫外線はレジオネラ属菌を含め、菌やウイルスに対して不活化効果を有しており、B. J. Dutka が行った研究¹⁰⁾では、レジオネラ属菌が直射日光に曝されると、生存率が急速に低下することが報告されている。また、波長別の強度に関し、環境省より図 4 のように報告されており¹¹⁾、300nm 未満の波長領域では、地表に到達する強度が急激に低下し、地上付近では紫外線 B (290~320 nm) が多くなると示されたため、以降の解析では、より短波長である紫外線 C の影響は考慮しなかった。

紫外線 B によるレジオネラ属菌の濃度減衰は、S. Rattanakul らが提案した Chick-Watson 不活化モデル式(1) に基づいて評価した。紫外線強度 (I_n) が与えられれば、経過後の濃度 (N_t) を予測することが可能である^{12),13)}。

$$\lg \frac{N_t}{N_0} = k \cdot I_n \cdot t \quad (1)$$

N_t : 経過時間 t 後の微生物濃度[CFU/mL]

N_0 : 開始時点の微生物濃度[CFU/mL]

k : 不活化速度定数[cm²/mJ]

(値は表 1 参照)

I_n : 波長別の紫外線強度[mW/cm²]

t : 照射時間[s]

大崎市の紫外線 B は拡張アメダス気象データの年標準 (2011~2020 年) データを使用した。ただし、市内には建物が存在し、地面に近い高さであるほど、周辺の建物に遮

られ、紫外線が届かない。そこで、図 5 のように周辺の建物の配置状況を正射影画像で再現し、場所ごとに届く紫外線強度を想定した。正射影画像は対象地点を指定したうえで、対象地点を中心とした 200m 以内の建物を OSM データより抽出し、対象地点の座標と抽出した建物の座標の関係をもとに作成した。図 5 より低い高さで作成した正射影画像ほど、周辺建物が緑色で広く表示されることが確認できる。

拡張アメダス気象データより入手できる紫外線 B には直達成分と拡散成分がある。作成した正射影画像を用いて、それぞれの成分の減衰量を算出し、それらを合算した値を式(1)の I_n に代入した。 I_n は直達成分と拡散成分に分けて算出する必要があり、直達成分については、拡張アメダス気象データに含まれる太陽高度および太陽方位角を用いて正射影画像上に太陽位置を設定し、建物によって遮蔽されない場合に、その地点へ到達するものとした。拡散成分は正射影画像の全体に対する天空部分となる黒色部分の割合を紫外線 B の拡散成分に乗ずることで求めることができる。この時の全体に対する天空部分の割合を天空率という。以下が I_n および拡散成分の計算式である。

$$I_{diff} = I'_{diff} \cdot SVF \quad (2)$$

I_{diff} : 紫外線強度の拡散成分 (計算後)
[mW/cm²]

SVF : 天空率[-]

I'_{diff} : 紫外線強度の拡散成分 (計算前)
[mW/cm²]

$$I_n = I_{dire} + I_{diff} \quad (3)$$

I_{dire} : 紫外線強度の直達成分 (計算後)
[mW/cm²]

③ 相対湿度によるレジオネラ属菌不活化

P. Hambleton らの研究は、屋外湿度の変化もエアロゾル化されたレジオネラ属菌の大気中での不活化に大きく影響することを明らかにしている¹⁴⁾。本研究でも P. Hambleton らの研究の相対湿度に対するレジオネラ属菌の生存率を参考にした。

④ CFD シミュレーションの計算設定

紫外線 B 及び、相対湿度の影響を加味するために粒子 1 点ごとの軌跡を CFD 解析より算出し、それぞれの粒子で紫外線 B 及び、相対湿度の時間ごとの影響を算出することとした。シミュレーション条件を 30 秒ごとに 2 粒子ずつ冷却塔より放出することとし、風速は 2.5 m/s、風向は南東、粒子の沈降速度をストークスの式を参考に計算したうえで、50 分間経過後の結果を図 6 に示す。図 6 より CFD により、粒子が分散された結果は確認できたが、発生源である冷却塔から離れるほど、粒子が分散して表示されている。この条件で計算を進めた場合、粒子の通過が予想される場所であるにもかかわらず、レジオネラ属菌を含むエアロゾルが一切存在しない箇所が発生する。そこで、許容可能な計算負荷に抑えつつ、粒子の分散を正確にとらえるために、冷却塔から放出される粒子は毎秒 8 個とした。また、粒子が発生源である冷却塔から北西方向に粒子が分布するため、冷却塔を計算範囲の南東端に配置することで、計算対象エリアを 4,000m × 5,000m × 60m とした。

C. 研究結果、および D. 考察

CFD より算出した粒子に時間ごとの紫外線 B、相対湿度の影響を加え、レジオネラ属

菌濃度を粒子ごと算出した。計算対象エリア内を 100m × 100m × 1m でメッシュ分割し、各メッシュ内の代表粒子の数に含まれるレジオネラ属菌の濃度を計算し、各メッシュ空間内のレジオネラ属菌濃度を算出した。その結果を図 7 に示す。図 7 は 10:00 ~ 11:00 の CFD 解析結果であり、地上 1m 高さにおけるレジオネラ属菌濃度を示したものである。(a)は紫外線を考慮せず、湿度効果のみを考慮した場合、(b)は雨天時、(c)は曇天時である。(d)は日射のない時間帯(20:00~21:00)におけるリスク領域を示した。また、図 7 のスケールの上限を 100 CFU/m³ とし、それ以上のレジオネラ属菌濃度の場所は危険なエリアと判断した。

図 7(a)では、強い海風に乗ってレジオネラ属菌が広範囲に拡散し、広域で高リスクなエリアを形成した。しかし、図 7(c)を見ると、地上 1m でのリスクエリアはほぼ完全に消失している。これらの結果より、曇天であっても雲を透過する紫外線 B が十分に存在し、浮遊するレジオネラ属菌が地上に沈降・到達する前に速やかに不活化されていることを示した。図 7(b)では地上付近に帯状のリスクエリアが残存している。雨雲(厚い乱層雲など)は紫外線 B の透過率を著しく低下させるため、空中での不活化速度が鈍化した結果だと考えられる。

図 7(d)では、紫外線 B による不活化がゼロになるため、生存率は湿度のみに依存する。ここで注目すべきは拡散の「形状」である。昼間(a)の広範囲な扇状の拡散とは異なり、夜間(d)ではリスクエリアが発生源(冷却塔)の比較的近傍に密集し、濃い帯状となっている。これは風配図で確認した通り、夜間は風速が低下するため、長距離への輸送

が制限されたためだと考えられる。また、計算対象都市は北西側に山があるため、現実的には CFD 解析よりもさらに、対象エリア内で分散するか、もしくは、北西側からの風が強くなり、発生源の南東側に高リスクになるエリアが形成される可能性がある。

E. 結論

本研究では、宮城県大崎市で発生した冷却塔を発生源とするレジオネラ症集団感染事例を対象に、GIS で再現した 3D 都市を基に CFD 解析を行い、紫外線 B による不活化効果と相対湿度の影響、粒子の沈降を計算モデルに反映させることで、広域におけるレジオネラ属菌の拡散プロセスと濃度分布を定量的に評価した。解析の結果、気象条件および時間帯がレジオネラ属菌のリスクエリアの形成に極めて重要であることが明らかとなった。得られた主な知見は以下の通りである。

紫外線 B による強力な不活化効果：日中の晴天時はもちろん、曇天時においても雲を透過する紫外線 B が十分に存在し、浮遊するレジオネラ属菌が地上に到達する前に速やかに不活化されるため、地上付近のリスクエリアは大幅に縮小または消失する。雨天時には、多くの領域でリスクは低いものの、特定の箇所でリスクエリアが残存した。

夜間におけるリスクエリアの局所化：日射のない夜間は紫外線による不活化効果が消失し、生存率が湿度のみに依存する。さらに、夜間は風速が低下し、エアロゾルの長距離拡散が制限されるため、発生源近傍に高濃度な帯状のリスクエリアが密集・停滞す

る。

これらの結果は、レジオネラ症の感染リスクが空間的・時間的な気象条件によって変化することを示唆している。

本研究で構築した手法は、冷却塔等の人工水系設備周辺における、レジオネラ属菌によるリスクを可視化し、分析することが可能である。今後は、対象地域の複雑な地形特性や建物の密集度がリスクエリアにどのように影響するかを詳細に分析する。また、他都市の事例にも本手法を適用することで、都市形状や環境因子がリスクエリアの形状に及ぼす影響を明らかにしていく。

F. 参考文献

- 1) レジオネラ症の集団発生について（第三報） - 宮城県公式ウェブサイト, <https://www.pref.miyagi.jp/release/covid-19/legionella20230911.html>, (accessed 31 March 2025).
- 2) レジオネラ属菌を含むエアロゾルの拡散濃度分布に関する研究 | 公益財団法人 日本建築衛生管理教育センター, <https://www.jahmec.or.jp/news/tyosa/2025/post-195.html>, (accessed 14 April 2026).
- 3) OpenStreetMap contributors, OpenStreetMap, <https://www.openstreetmap.org/copyright/en>, (accessed 30 October 2023).
- 4) 基盤地図情報ダウンロードサービス, <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>, (accessed 31 March 2025).
- 5) 国際航業株式会社, PAREA-LiDAR 航空レーザデータ, <https://www.kkc.co.jp/service/item/5672/>, (accessed 31 March 2025).

- 6) R: The R Project for Statistical Computing, <https://www.r-project.org/?adlt=strict&toWww=1&redig=003305AA01C54F5999C5E2D44F67553C>, (accessed 21 December 2022).
- 7) the U.S. Department of Energy, EnergyPlus, <https://energyplus.net/?adlt=strict&toWww=1&re>
- 10) <https://www.cradle.co.jp/product/stream.html>, (accessed 31 March 2025).
- 11) B. J. Dutka, Sensitivity of *Legionella pneumophila* to Sunlight in Fresh and Marine Waters (1984) Vol. 48.
- 12) オゾン層等の監視結果に関する年次報告書 平成22年8月環境省 (環境省, 2010).
- 13) S. Rattanakul and K. Oguma, Water Res 130, 31 (2018).
- 14) Y. Oh, J. Sangsanont, H. Woo, L. A. Boczek, K. G. Linden and H. Ryu, Science of the Total Environment [DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.167781].
- 15) P. Hambleton, M. G. Broster, P. J. Dennis, R. Henstridge, R. Fitzgeorge and J. W. Conlan, J. Hyg. (Lond). 90 [3], 451 (1983).
- 8) Trimble Inc., SketchUp, <https://www.sketchup.com/en/benefits-of-sketchup>, (accessed 31 March 2025).
- 9) STREAM | Cradle CFD | Hexagon, Transmission Investigation Part1 A CFD Simulation of Cooling Tower Dispersal, Mechanistic Analysis; in 日本建築学会大会学術講演梗概集・建築デザイン発表梗概集 1193-1194 (一般社団法人日本建築学会, 2025).
- WU HE, 森 太郎 & 大沢 飛智; Legionella Transmission Investigation Linked to Sunlight Disinfection; in 日本太陽エネルギー学会講演論文集 317-320 (一般社団法人日本太陽エネルギー学会, 2025).
- H. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む.)
特許取得・実用新案登録・その他はなし

G. 研究発表

1. 論文発表

無し

2. 学会発表

呉 禾, 森 太郎 & 大沢 飛智; Legionella Transmission Investigation Part2 Extended-Range CFD Simulation of Cooling Tower; in 日本建築学会北海道支部研究報告集(98) 141-144 (日本建築学会北海道支部, 2025).

呉 禾, 森 太郎 & 大沢 飛智; Legionella

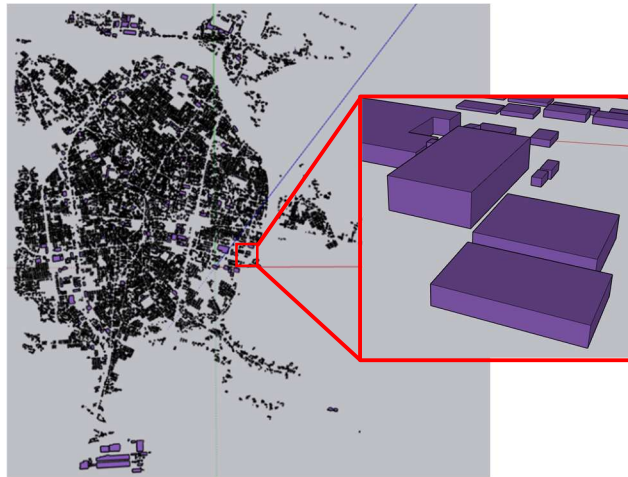


図 1 Google SketchUp 上で可視化した 3D モデル

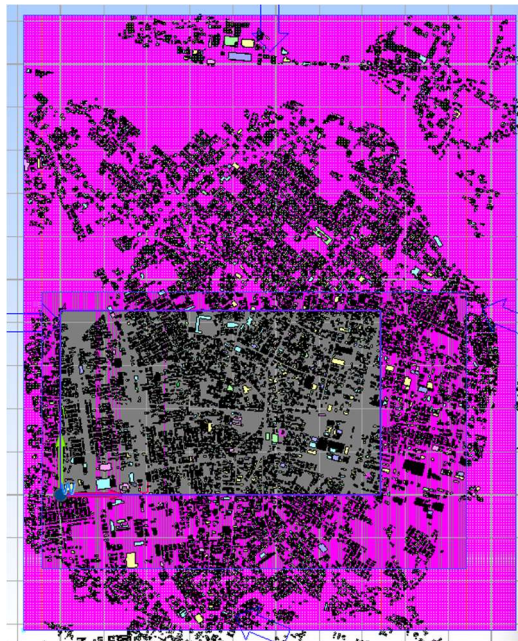


図 2 STREAM で取り込んだ建物の配置図

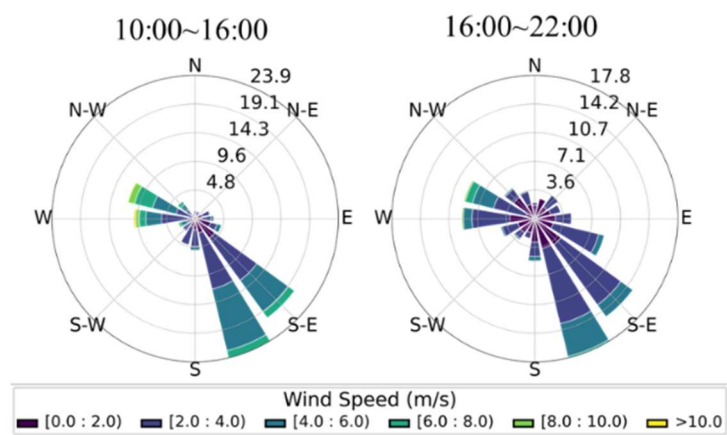


図 3 6~8 月の風配図

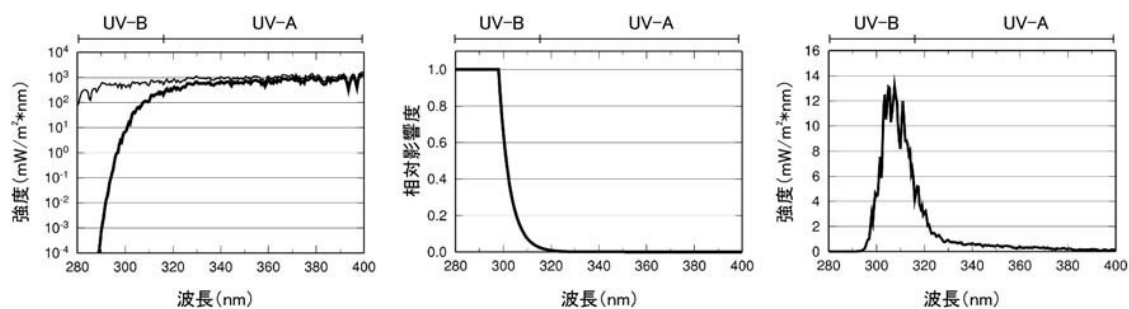


図 4 波長別紫外線強度と紅斑紫外線強度の関係（環境省）＊参考文献 11 より抜粋

表 1 異なる紫外線波長において、フルエンス応答曲線の対数直線部分から得られた不活化速度定数 k ＊参考文献 12 より抜粋

紫外線の波長	254nm	260nm	280nm	300nm
不活化速度定数 k	6.62×10^{-1}	8.60×10^{-1}	4.53×10^{-1}	0.48×10^{-1}

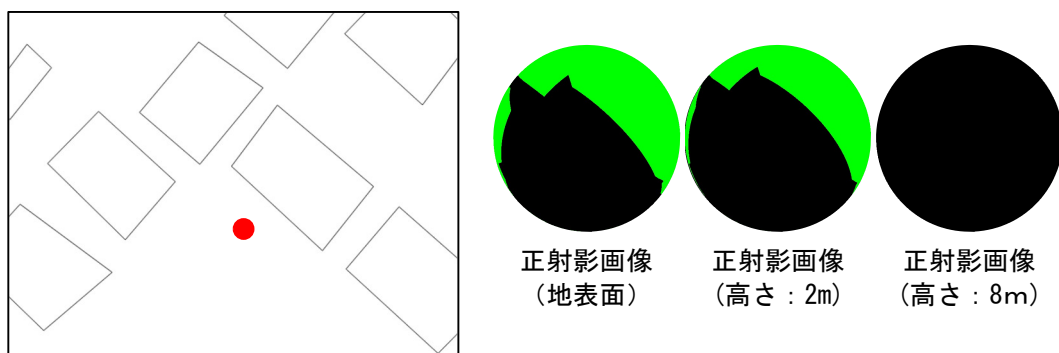


図 5 赤点における高さ別正射影画像

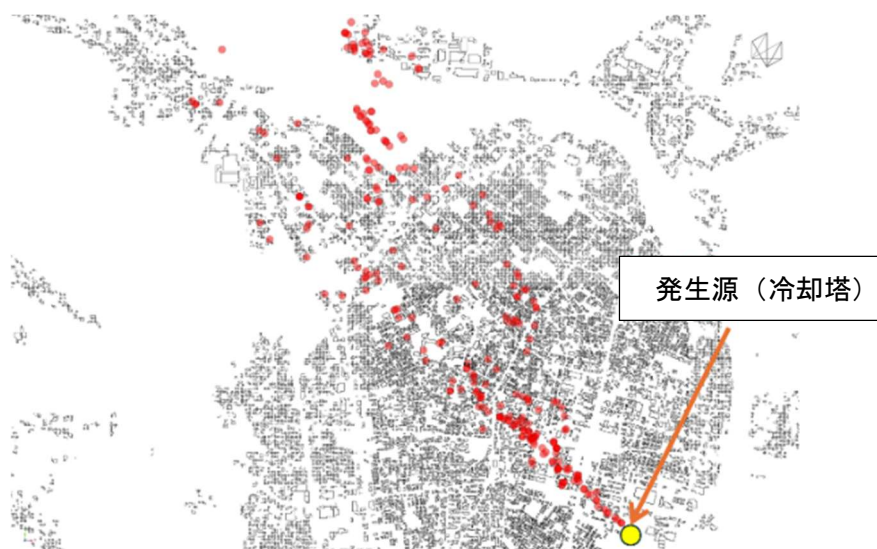


図 6 粒子の軌跡計算

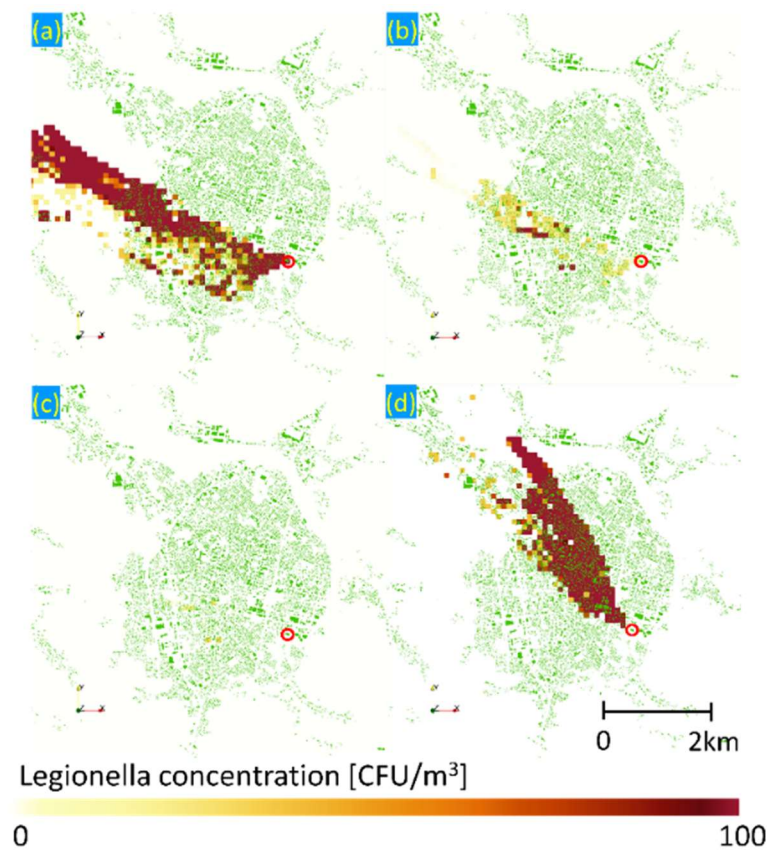


図 7 CFD 解析によるレジオネラ属菌の濃度分布