

臭気物質と微生物を運ぶエアロゾル

宇都宮大学 農学部
農業環境工学科 教授

池口 厚男

1. はじめに

畜産における重要な課題の一つは悪臭であり、畜産に対する苦情のトップを常に維持し続けている。飼養規模の拡大、宅地との混住化等、近隣住民の畜産に対する目は厳しくなっている。畜産農場から5 kmも離れた住民から悪臭苦情があり、それよりも農場に近い住民からの苦情がないという場合や、悪臭の苦情があり、農場敷地境界で悪臭防止法に基づき計測を行なっても基準値以下しかないという場合が多々ある。これらのことは農場の悪臭の拡散が単なるガスの拡散現象のみではないことを示唆すると思われる。当然、悪臭が発生するタイミングとしての農場内作業や気象条件の要因が考えられる一方、エアロゾルによる悪臭成分の輸送という現象から説明がつく。畜舎で発生するエアロゾルには臭気成分が吸着し、エアロゾルが遠方まで風で運ばれて、そこで臭気がエアロゾルから発生するという報告がある¹⁾。エアロゾルが臭気を拡散させる一つの媒体である。

2010年に宮崎県で発生した口蹄疫や高病原性鳥インフルエンザ等の家畜伝染病は畜産のみならず地域経済に大きな損害をもたらした。特に口蹄疫の伝播にはエ

アロゾルの関与が多数報告されている。家畜感染症の伝播は病原体が付着したバイオエアロゾルの拡散が一つの要因となっている。

上記のように悪臭、家畜感染症の伝播に関して、エアロゾルは共通の鍵になるものと考えられる。ここでは、畜産で発生するエアロゾルについて概説する。

2. エアロゾルについて

(1) エアロゾルとは何か？

エアロゾルとは気体中に浮遊する微小な液体または固体の粒子と定義されている。その生成過程の違いから粉じん(dust)とかフェーム(fume)、ミスト(mist)、ばいじん(smokedust)等の呼び方がある。気象学的には、視程や色の違いなどから、霧(fog)、もや(mist)、煙霧(haze)、スモッグ(smog)等に分類している。

性状は、粒径や化学組成、形状、光学的・電気的特性など多くの因子によって表され、きわめて複雑である。分子やイオンとほぼ等しい $0.001\mu\text{m}=1\text{nm}$ 程度から花粉のような $100\mu\text{m}$ 程度まで約6桁にわたる広い範囲が対象となる。

(2) 濃度と粒径

エアロゾル濃度の表現方法には、単位容積あたりの質量で表す質量濃度、単位容積あたりの個数で表す個数濃度がある。粒径測定一つをとっても、単一の方法はもとより同一の原理に基づく方法により全域を測定することは容易でない。粒径にも幾何学的粒径、電気移動度粒径、光散乱等価径、空気力学粒径等があり、それぞれ測定器が異なる。エアロゾルの形状は複雑かつ、不規則であるため、球や立方体のように単純に粒径を定義できない。決められた規則にしたがって測定した粒子の長さをそのまま粒径とした長軸径、短軸径、定方向径などがある(図1)。

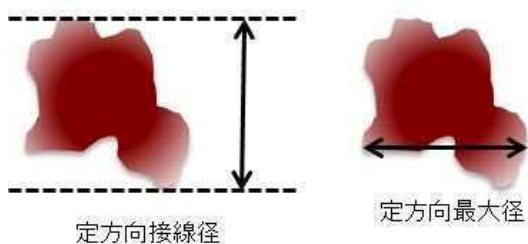


図1 定方向径

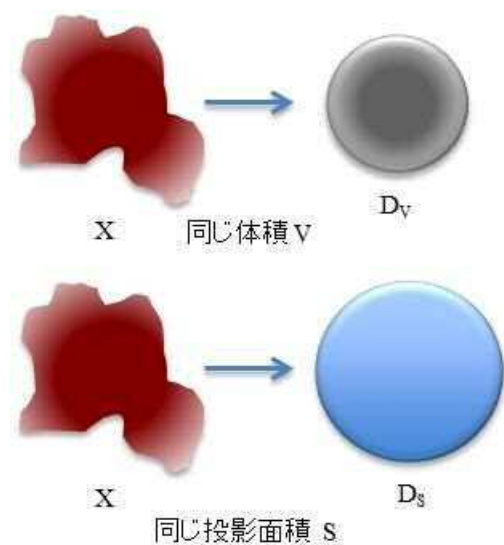


図2 相当径

粒子の投影面積、体積を幾何学公式を用いて円、球、立方体等の規則的な形状の粒子に換算してそれを粒径とする相当径というものがある(図2)。また、特定の物理的な条件を仮定したとき導かれる物理学的法則(例えばミー(Mie)理論)を用いて測定量を粒子径に算出する有効径がある。光散乱では図3に示すようにレーザー回析パターンで粒子径を算出する。これが光散乱等価径である。

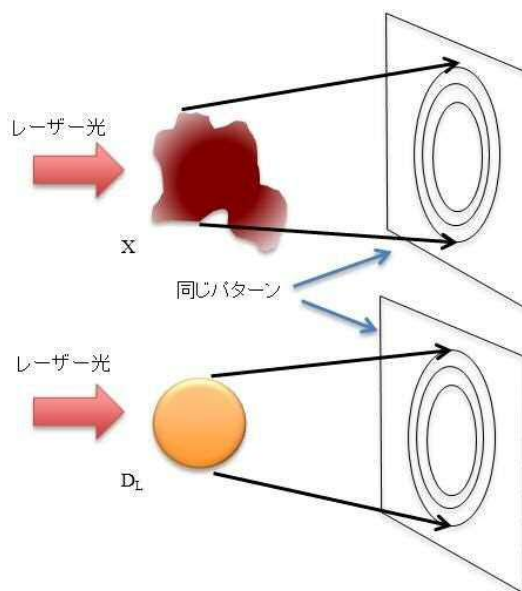


図3 光学的特性における有効径

(3) 伝播や拡散と粒径

家畜感染症の空気伝播や悪臭の拡散を考えた場合は、動力的な特性を考慮する必要がある。これには2種類あり、1つはストークス(Stokes)径と空気力学径である。Stokes径は、その粒子と同じ密度と沈降速度を持つ球の直径である。空気力学径は、その粒子と同じ沈降速度を持つ単位密度($\rho_p = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)の球の

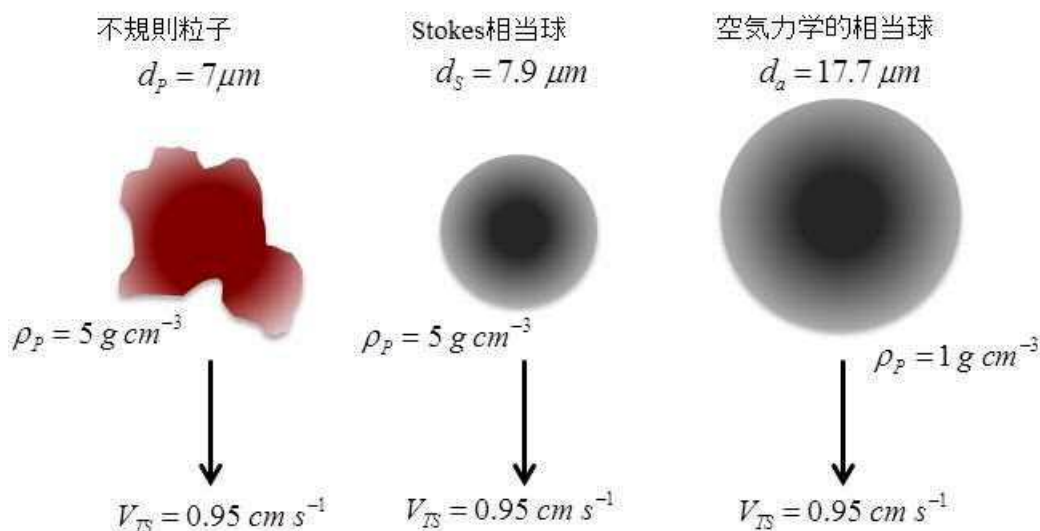


図4 空気力学的な有効径

直径である(図4)。これらの関係を式で表すと以下となる。

$$V_{TS} = \frac{\rho_b d_s^2 g}{18\eta} = \frac{\rho_o d_a^2 g}{18\eta}$$

V_{TS} : 終末沈降速度

ρ_b : 平均密度

ρ_o : 単位密度

d_s : Stokes 径

d_a : 空気力学径

g : 重力加速度

η : 粘性

空気力学径は形状のみならず、密度についても基準化している²⁾。

3. 畜舎内エアロゾル

(1) エアロゾル研究のはじまり

畜舎内のエアロゾル研究は、約30年前に欧州で作業者の呼吸系の疾病と畜舎内のエアロゾルとの因果関係を調査するところから始まった。その後、欧米を中心に畜種、畜舎の換気システムと舎内のエ

アロゾル濃度の関係を調査した研究が多数報告されるようになった。それらの結果からエアロゾル濃度を低くする換気システムを見いだそうとした。また、畜舎内のエアロゾル濃度を低減させる研究として植物油の噴霧に関する報告が見られた。

(2) 豚舎

豚舎内でのエアロゾル濃度は $1.3 \sim 23.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、アンモニア濃度は $5 \sim 12 \text{ ppm}$ 程度である³⁾。豚舎内のエアロゾルの乾物は約87%で、そのうち約24%がタンパク質、約4%が脂肪、約15%が灰分である⁴⁾。これらは、餌、豚の体(ふけ等)、ふん等から発生すると言われており、餌が80~90%、ふんが2~8%、豚の体から2~12%の割合であると報告されている⁵⁾。

(3) 鶏舎

一方、鶏舎内でのエアロゾル濃度は $1.2 \sim 17.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ である⁶⁾。ちなみに建築物環境衛生管理基準でのエアロゾル濃度

は $0.15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ である。エアロゾル濃度の約 90 % が乾物であり、そのうちの約 60 % がタンパク質、約 9 % が脂肪、約 4 % が繊維である。これらの由来は、鶏の羽や皮膚であると言われている⁴⁾。一方、アンモニア濃度は 2 ~ 47 ppm 程度で、50 ppm 以上になる場合もある。

(4) 微生物の濃度

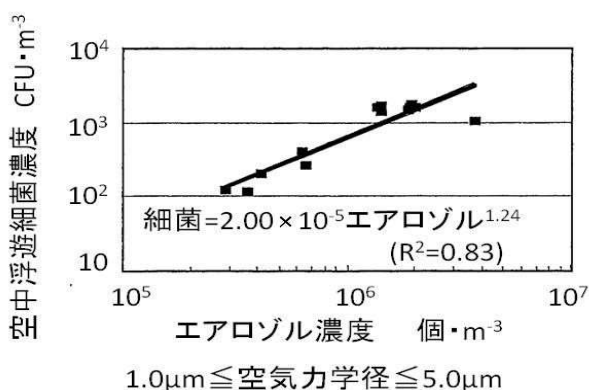


図5 無窓採卵鶏舎内のエアロゾル濃度と空气中一般好気性生菌濃度

無窓採卵鶏舎において空气中に浮遊している微生物濃度とエアロゾル濃度との間には高い正の相関関係があることが認められた(図5)⁷⁾。

病原体はそのままの形で空气中に浮遊していない。エアロゾルとして空气中に浮遊する。空気力学径で 5 mm 以下の粒子はパッシブスカラーと呼ばれ、気流とともに動く。それより大きな粒径になると外力(重力)の影響を受けて気流とは異なった動きをする。エアロゾルの舎内での発生は動物の行動、生活リズムと密接な関係がある。これは飼養管理における作業と密接に関係するということである。

図6に無窓採卵鶏舎の1日のエアロゾル濃度と空气中一般好気性生菌濃度の変動を示す⁸⁾。これを見ると明らかに照明が点灯と消灯、給餌が行なわれた時に濃度が高くなる傾向を示した。このことはエアロゾル濃度や微生物濃度を測定する際に測定者が動物の行動に与える影響を考慮しなければならないことを示している。逆にエアロゾル濃度の制御を行なう場合、濃度が高くなる作業、動物が行動をするときに制御機を作動させると濃度のピークを抑えることができることを示すものである。

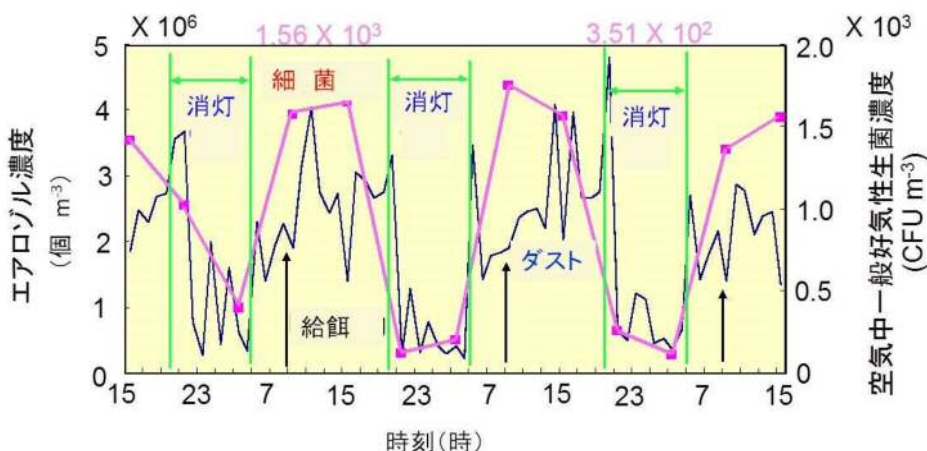


図6 無窓採卵鶏舎内のエアロゾル濃度、空气中一般好気性生菌濃度の日内変化

4. エアロゾルの拡散

(1) 畜舎の換気方式

エアロゾルの畜舎からの拡散は、舎外気象条件や畜舎が建設されている地理的な要因に左右されるのは当然であるが、畜舎の換気タイプによっても大きく影響される。畜舎の換気方式は自然換気と換気扇を使用した強制換気の2種類があり、各換気方式によって畜舎の構造が異なる。前者は開放型と呼ばれ側壁部に開口部(窓等)がある。牛舎では、ほとんど柱のみで、屋根と柱だけという場合もある。後者は閉鎖型で開口部がなく無窓畜舎と呼ばれる場合もある。養鶏や養豚に多く用いられている。これらの折衷型もある。閉鎖型で陰圧換気の場合は排気空気の出る場所が特定できるので舎内で汚染され

た空気をトラップする方策をたてやすい。しかし、開放型の場合、自然換気であるため舎外の風や天候に影響され、入排気の位置が特定できないため汚染空気のトラップは困難である。また、畜舎形状や周辺状況によって汚染空気の舎外への拡散が異なってくる。

開放型フリーストール乳牛舎、開放型豚舎、閉鎖型2階建ブロイラー鶏舎の各建物からの汚染空気の拡散を明らかにするため風洞模型実験を行ったのでその内容を紹介する。

(2) フリーストール乳牛舎

フリーストール乳牛舎は図7に示すように一般的にオープンリッジ、セミモニター、片流れの3つの屋根形状がある。

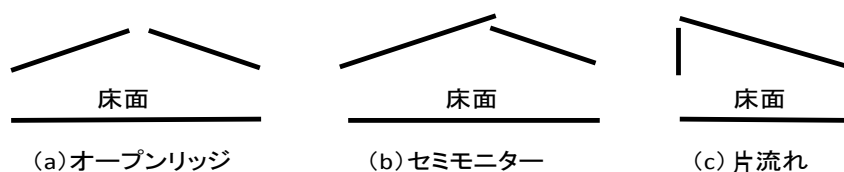


図7 開放型フリーストール乳牛舎の屋根形状(立面)

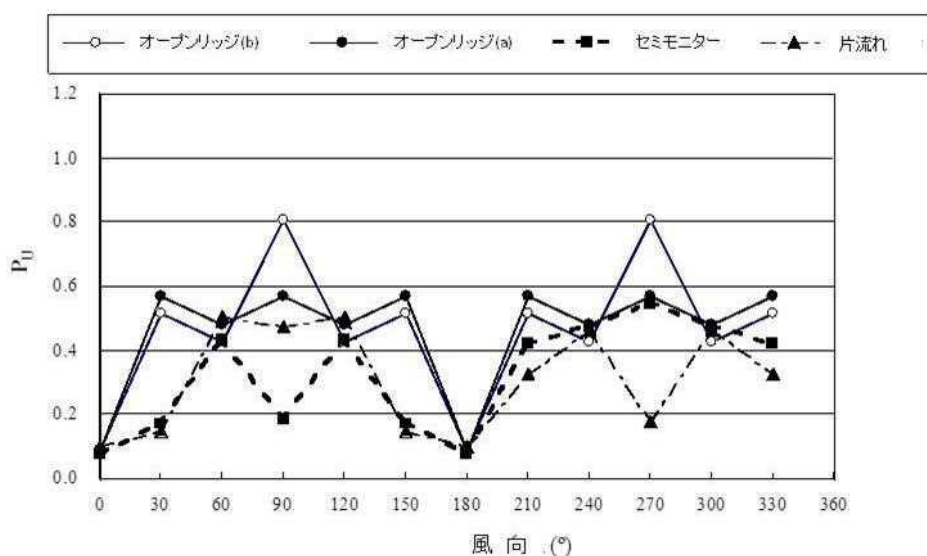


図8 フリーストール乳牛舎の屋根形状の違いによる拡散する度合いの違い

風洞模型実験では等温条件、汚染物質は空気とともに動くパッシブスカラーと仮定した。汚染物質のマーカールは問わず、気流の抜ける量で評価を行った。屋根形状によって舎内から舎外への拡散する量が異なり、舎内から舎外への拡散が大きい順は、オープンリッジ、セミモニター、片流れであった⁹⁾。図8は棟高きの2倍の距離風下側に離れた位置での拡散されうる度合いを表したものである¹¹⁾。屋根形状や風向によって拡散の度合いが異なることがわかる。これは屋根の形状の違いが後流の形態の違いや外気の流入量に影響したことが原因であった。オープンリッジは風向の影響を最も受けた屋根形状であった。

(3) 開放型豚舎

前述した(2)と同様の仮定をおいた場合、開放型豚舎では図9に示すように風上側に豚舎の棟高きの3倍の距離に高さが軒高さと等しい防風壁を設置すると、外風が防風壁により跳ね上がり、風下側から風上に向かって後流が豚舎内に流入し、中の空気を風上側に出すという経路を取る。防風壁と豚舎の間に、舎内から速度の遅い気流が出てくるので、この場所に臭気が停滞することが予測される。したがって、スプリンクラー等をこの箇所に設置し、気象データと連動させることで、農場内で臭気をトラップすることが可能となる(図10)¹⁰⁾。

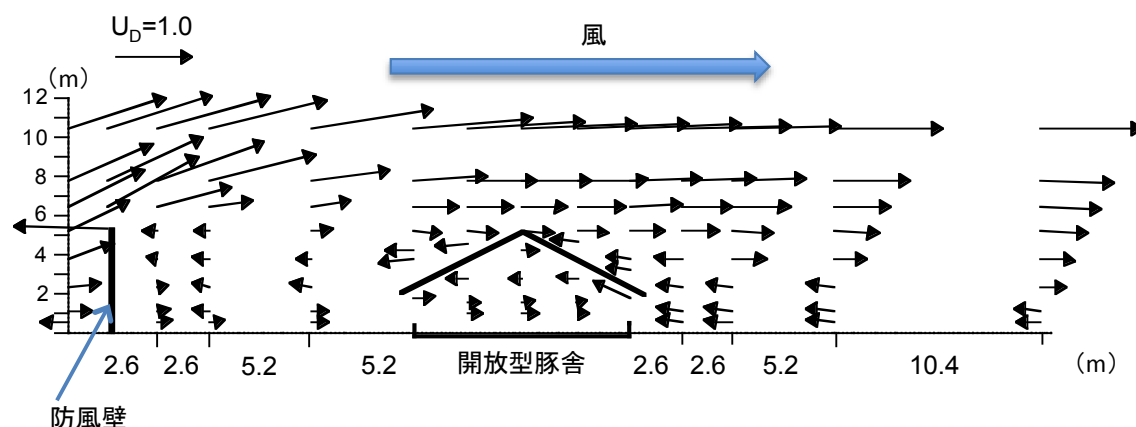


図9 風上に防風壁がある場合の開放型豚舎内外の無次元気流速分布

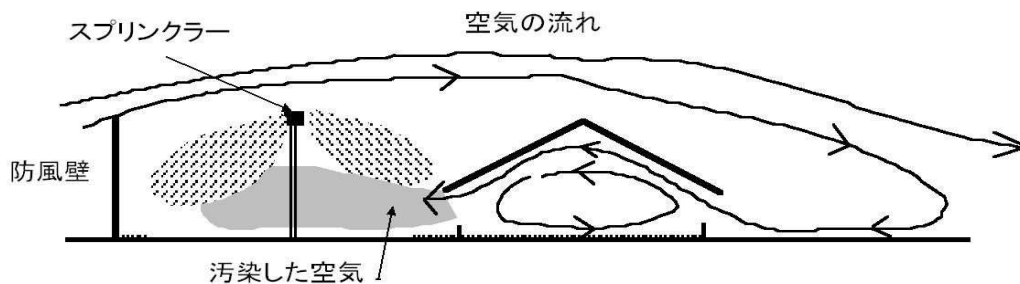


図10 風上に防風壁を利用した対策技術の例

(4) 2階建閉鎖型ブロイラー鶏舎

非等温条件、汚染物質のマーカースとして空気と比重が同じであるエチレンを用いた風洞模型実験を行った。図11に示すような2階建閉鎖型ブロイラー鶏舎において最も拡散量が多いケースは、2階から汚染物質が放出され、排気ファンが風下を向いた場合である。

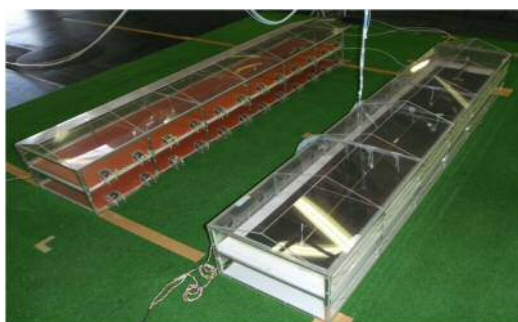


図11 2階建無双ブロイラー鶏舎模型

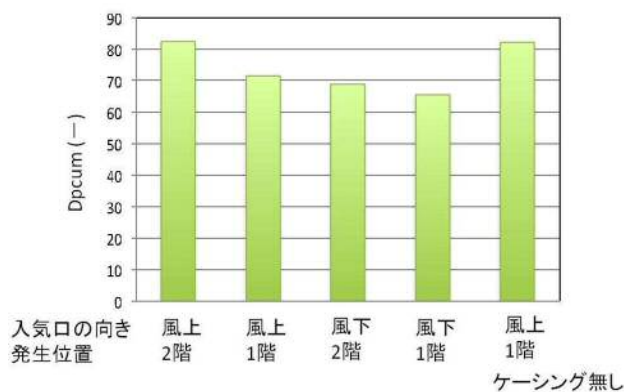


図12 模型鶏舎の棟高さの10倍までの距離の汚染物質の拡散量
(Dpcum: 鶏舎から風下のある距離までの積算の拡散量)

最も少ないのは、1階から汚染物質が放出され、排気ファンが風下に向いている場合である。汚染物質が発生する位置の影響は、1階で発生した方が拡散量は少

ないことが言えた。入気口の方向は入気口が風上を向いている場合のほうが拡散量は多くなった。入気口が風下を向いている場合は、発生源が風下であっても、風上側の鶏舎に汚染物質が到達する可能性が考えられる。排気ファンにケーシングがないと拡散量が多くなった(図12)。

5. 畜舎間での伝播

前節と同様に風洞模型実験によって畜舎間で汚染物質が伝播する量を計測したので紹介する。隣接する畜舎に対しては、畜舎間の距離によって発生した病原体等の汚染物質の侵入量が異なった。前節の(3)の開放型豚舎、(4)の2階建無窓鶏舎それぞれに対してエチレンをマーカースとし、畜舎間の距離を要因として風洞実験を行った。

(1) 開放型豚舎間の伝播

ここで興味深いことは、風下で発生した汚染物質は風上側の畜舎に侵入するという結果が出た事である(図13)。侵入量は畜舎間の距離によって異なり、棟高さの3倍の距離が離れていると、棟高さと同じ距離だけ離れた場合と比較し、100倍も侵入が少なくなる。畜舎間の距離が棟高さと同じである場合は、発生濃度の約1%の濃度が侵入された畜舎内で確認された¹¹⁾。

(2) 2階建閉鎖型鶏舎間の伝播

実験因子は畜舎間距離と発生位置である。畜舎間距離は、棟高さ(H)を基準に、その1(1H)、2(2H)、4(4H)倍の3水準とした。発生位置は、風上、風下の各建物の1階と2階の各室の4カ所の4水準とした。

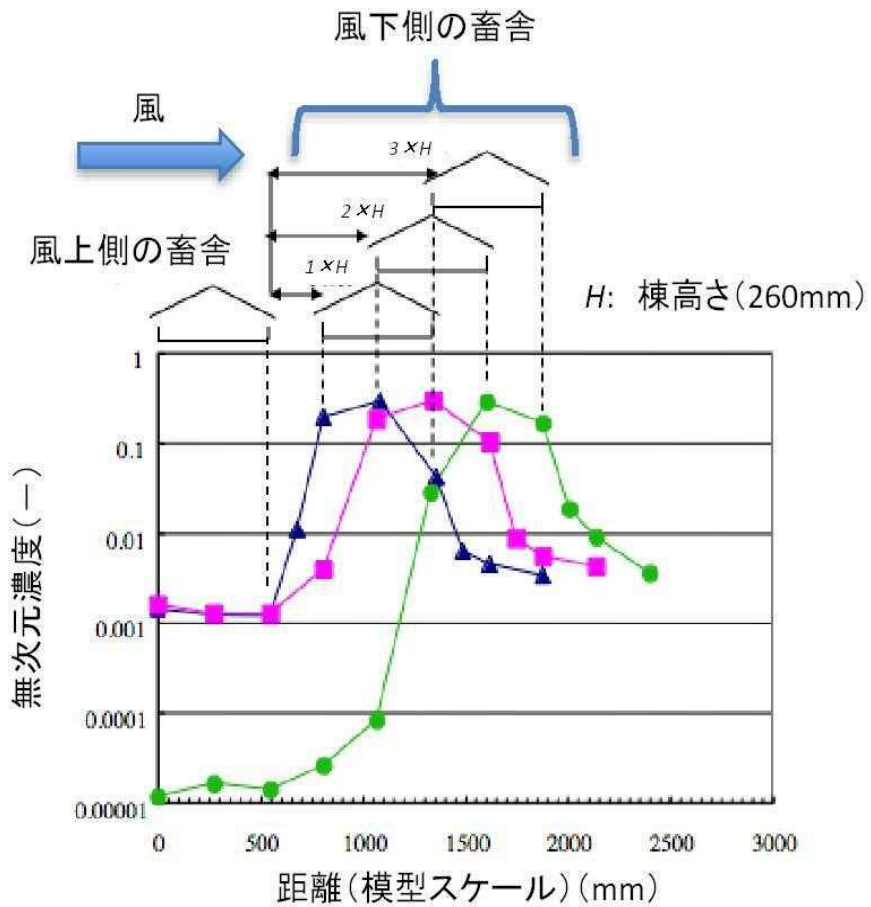


図13 風洞模型実験による畜舎間の汚染物質の伝播(汚染物質の発生は風下側の畜舎)

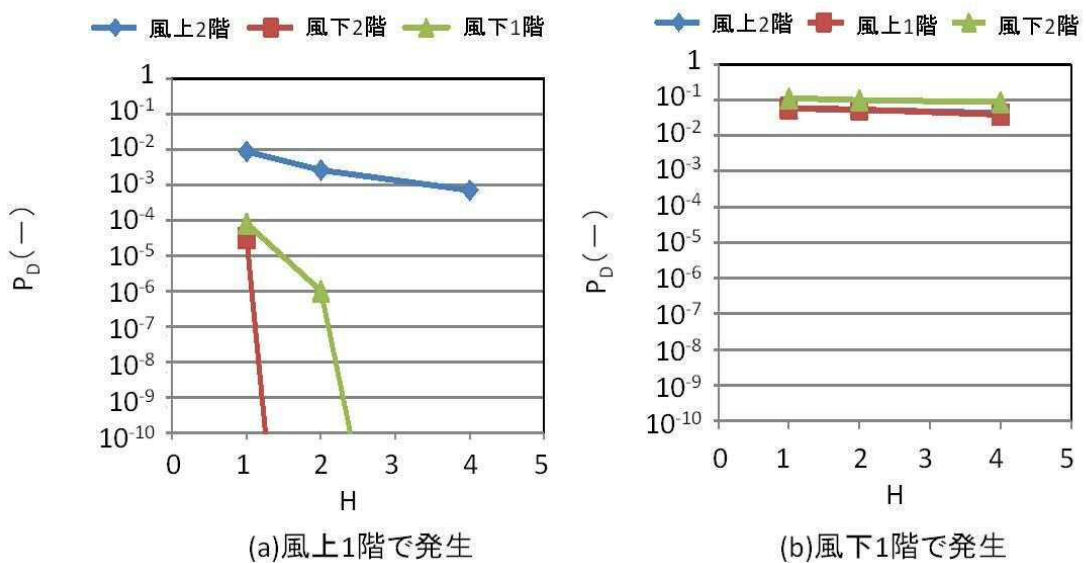


図14 閉鎖型鶏舎における畜舎間距離、発生位置の違いによる各室の侵入濃度

風下の建物から発生した場合のほうが、風上の建物から発生するよりも隣接の建物の室に侵入する割合は高くなった。例えば風下の1階で発生すると風上の建物の1階、2階の室の濃度は発生濃度の 10^{-2} の濃度となるが、風上の建物で発生した場合は、 10^{-6} から 10^{-3} の濃度となる(図14)。畜舎間距離が長くなるほど侵入した濃度

は低くなった。本条件で最も伝播量が低くなったのは、発生源が風上の建物の1階で、畜舎間距離が4Hの場合であった。舎外への拡散量は、畜舎間の空間で多く、風上の建物から6Hの距離を離れるとどの条件でも同程度の拡散量となることが明らかになった(図15)¹²⁾。

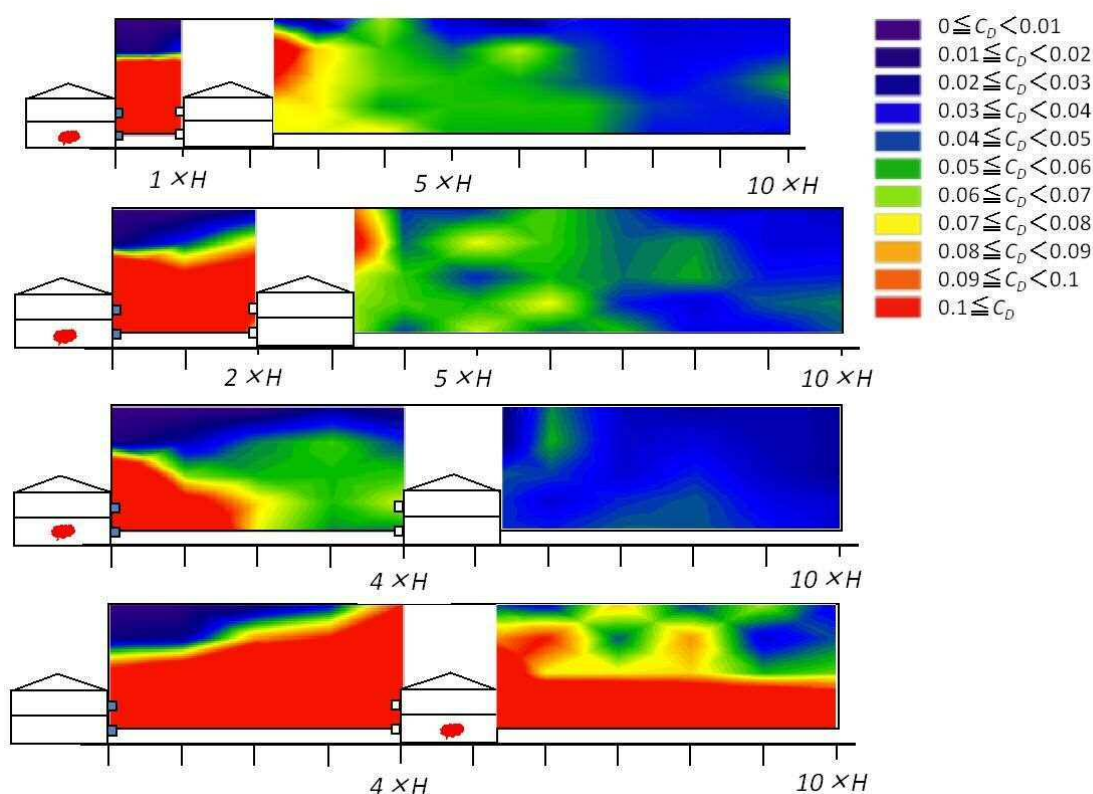


図15 鶏舎間距離、発生位置による舎外への拡散性状

引用文献

1) Bottcher, R.W. 2001. An environmental nuisance: Odor concentrated and transported by dust. (環境被害;ダストによって濃縮され運ばれる悪臭) *Chemical Senses*, **26**(3), 327 - 331.

2) ウィリアム C. ハイNZ. 1985. エアロゾルテクノロジー. (訳) 井上書院. pp 52.

3) Robertson J.F. et al. 1993. Dust and Ammonia Concentrations in Pig Housing: The Need to Reduce Maximum Exposure Limits. (豚舎のアンモニアとダスト; 最大曝露限界を低減する必要性) *Proceeding of Fourth International Livestock Environment Symposium*.

- 694-700.
- 4) Dawson, J.R., 1990. Minimizing Dust in Livestock Buildings: Possible Alternatives to Mechanical Separation. (畜舎のダストの低減; 機械的分離に替わるものの可能性). *J. agric. Engng Res.* **47**, 235-248.
 - 5) Riskowski, G.L. 2003. Overview of methods to reduce odorant emissions from confinement swine buildings. (豚舎からの臭気揮散を低減する手段の概要) University Illinois Pork Industry Conference Swine Odor and Manure Management.
 - 6) Whyte R.T. et al. 1993. Air Pollutant Burdens and Respiratory Impairment of Poultry House Stockmen. (ハウス養鶏業者の大気汚染負荷と呼吸被害) Proceeding of Fourth International Livestock Environment Symposium.
 - 7) Ikeguchi, A. 2001. Relationship between Airborne Bacteria and Dust Concentration in Layer House. (採卵鶏舎における大気中の細菌とダスト濃度の関係) Proceeding of Sixth International Livestock Environment Symposium.
 - 8) Ikeguchi, A. 2002. Ultra sonic sprayer controlling dust in experimental poultry houses, (超音波式散布機による実験鶏舎のダストの制御) *CIGR E-journal* Volume 4, manuscript BC 01 002 : 1-10.
 - 9) Ikeguchi, A. and Okushima, L. 2001. Airflow patterns related to polluted air dispersion in open free-stall dairy houses with different roof shapes, (型式の異なる開放フリーストール牛舎における汚染空気の拡散と関係する気流パターン) *Transactions of the ASAE*, **44** (6) : 1797-1805.
 - 10) Ikeguchi, A., Okushima, L., Bennetsen, J. C. 2003. Windward windbreak effects on airflow in and around a scale model of a naturally ventilated pig barn. (模型自然換気豚舎の内部及び周辺における風上の防風壁が気流に与える影響) *Transactions of the ASAE*, **46** (3) : 789-795.
 - 11) Ikeguchi, A., Okushima, L., Zhang, G. and Strom, J. S. 2004. Contaminant air propagation between naturally ventilated scale model pig buildings under steady-state conditions (大気安定条件下の模型自然換気豚舎における汚染空気の拡散). *Biosystems engineering*, **90** (2) : 217-226.
 - 12) Ikeguchi, A. and Okushima, L. 2009. Propagation and dispersion of contaminant air between enclosed forced ventilated scale model broiler buildings (模型の閉鎖式強制換気豚舎における汚染空気の拡散). *Journal of the Society of Agricultural Structures, Japan*, **40** (1) : 35-46.