

水族館内の飼育用海水槽で発生する海塩粒子の室内における拡散挙動 数値流体解析による海塩粒子の行方の推定

Diffusion of sea salt particles generated in breeding sea tank in aquarium

Analysis of Trajectory of Sea Salt Particles by Computational Fluid Dynamics

○宇佐美 恒 (神戸大学)

高田 暁 (神戸大学)

Kou USAMI*1 Satoru TAKADA*1

*1 Kobe University

We analyzed the behavior of sea salt particles (0.1, 1, 5 μm in diameter) generated from seawater tanks using computational fluid dynamics. As a result, sea salt particles with smaller particle sizes (0.1 and 1 μm) tended to distribute over the seawater surface tank, while particles with larger particle sizes (5 μm) tended to fall on the floor and the seawater surface. The particles adhered to pipes located 1.3 m and 1.8 m above the seawater surface mainly on the top and sides of the pipe.

はじめに

水族館内の飼育用海水槽のある室内では、設備配管や照明器具等の金属部にサビが見られる¹⁾。サビの原因物質は塩化物であることが知られており²⁾、室内における塩分発生の一因として、海水槽でのエアレーション（水槽内の水に酸素を送ること）に伴う海面での気泡の破裂や波によって生じたしぶきが考えられる³⁾。これより、海塩粒子が海水槽の水面から室空気へ飛散し、室内気流によって拡散し、金属部に付着することでサビの発生を助長している可能性が考えられる。これまで、海水槽のある室における気中塩分濃度の測定により、気中に塩分が1~230 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ の濃度で存在し、海水槽の水面から発生した海塩粒子が気中に浮遊していることが示されている⁴⁾。本研究では、海水槽から発生する海塩粒子を換気や空調により効率よく除去する方法を検討するために、発生した海塩粒子の室内における行方を数値流体力学を用いて解析する（図1）。発生した海塩粒子の行方として、換気の吸込口から除去されるものや、床面や配管面に付着するもの、海水面に沈降するもの、気中に浮遊するものが考えられる。また、発生する海塩粒子の粒径に応じた挙動についても検討を行う。

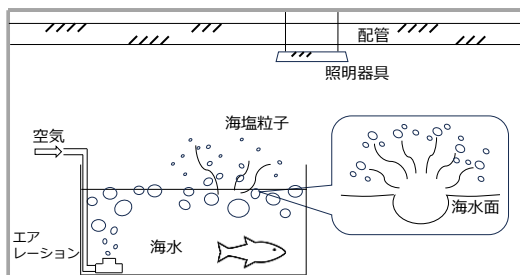


Fig.1 Conceptual drawing of a room with a breeding sea tank to be treated in this study.

1. 方法

1.1 数値流体解析の対象

解析対象は岩島ら(2023)⁴⁾により気中塩分濃度の実測調査が行われた水族館内の飼育用海水槽のある一室(気積459.9 m^3)とする。その平面図と立体モデルを図2、図3に示す。建物の図面より寸法や換気口、一部の配管、海水槽の位置を再現し、海水槽は海水面積(室内空気と海水との接触面積)が実際と同じ約50 m^2 となるように簡略化している(海水面は床面上1m)。室内に冷暖房設備はなく、第1種換気(強制給排気)が行われている。吹出口(床面上2.8m)と吸込口(床面上2.3m)は全て配管の下面についている。

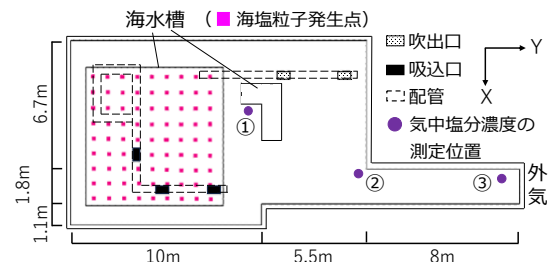


Fig.2 Plan view of a room with a breeding sea tank in the aquarium to be analyzed, showing the point of sea salt particle generation and the location of the measurement of air salinity (1m high) in the figure.

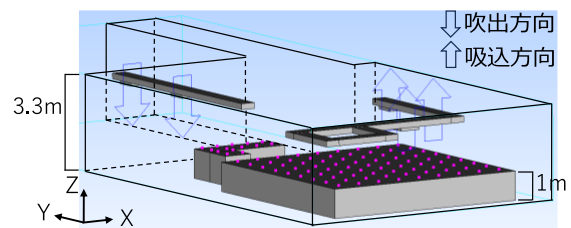


Fig.3 3D model of the room to be analyzed.

1.2 数値流体解析の方法

まず室内の気流場について定常解を求め、それを初期条件とし、海水面から海塩粒子を1秒間隔で等量発生させ続け、非定常解析によって気流場と粒子の運動を求め、空間を離散化し流れ場（流体）を連続相としてEuler的に解き、流体中の粒子は分散相として個別にLagrange的に追跡し、流体と粒子の連成解析を行う。解析時間間隔は0.024s、解析終了時間は1200sとする。解析条件を表1に示す(吹出口と吸込口の位置と向きは図2, 3参照)。冬季の状態を想定し、室温の実測結果⁴⁾をもとに海水温25°C(熱帯魚の飼育用海水槽)、室温が18°Cになるように温度境界条件を設定する。

対象室における海塩粒子の全体発生量は、対象室内の3地点における気中塩分濃度の実測値を用いて室の塩分収支式から概算した^{註1)}。解析条件では想定した全体発生量を海水面に均等に与えた(図2の計95点)。1点から発生させる海塩粒子の条件を表2に示す。粒径を3つ想定し、それぞれ粒径や質量、その他物性が均一な球形の剛体粒子とし、空気中で蒸発せず浮遊すると仮定する。また、海塩粒子の反発係数は衝突の条件に関係なく一定とし、反発係数は1とする。ただし、海塩粒子の粒径の違いによる沈降の影響を調べるため、床面と海水面、配管面、壁面における反発係数は0とし、面に接した場合に吸着するとした。また、吸込口に入った粒子は消滅するとした。

Table 1 Analysis conditions

| | |
|-------|--------------------------------------|
| 乱流モデル | 標準 k-ε モデル |
| 格子数 | 約 150 万 (80mm 等幅分割) |
| 室内壁面 | 対数則(速度境界層) 断熱(温度境界層) |
| 海水面 | 対数則(温度境界層) (25°C) |
| 吹出口 | 流量規定 各 3,000m ³ /h (18°C) |
| 吸込口 | 流量規定 各 2,000m ³ /h |

Table 2 Conditions for sea salt particles to be generated.

| | |
|----------------------|----------------------------|
| 粒径 | 0.1/1/5 μm ⁵⁾ |
| 密度 | 1030kg/m ³ |
| 反発係数 | 1(床面と海水面、海水面、壁面0で吸着) |
| 質量 | 8.1×10 ⁻¹⁰ kg/s |
| 発生速度 | 10m/s(鉛直上向き) |
| パーセル数 ^{註2)} | 40 個/s |

2. 結果

2.1 室内気流分布

海塩粒子発生後、定常状態と判断された室の鉛直3断面における室内気流分布を図4に示す。断面A-A'の気流分布より、吹出口から鉛直下向きに出た気流が床面に衝突後、床面沿いを0.2~1.2m/sで流れている。断面B-B'の気流分布より、吹出気流に周辺の空気が巻き込まれ乱れており、小さい海水槽の水面の一部には吹出気流が衝突している。大きい海水槽の水面上の気流は天井まで全体的に静穏である。断面C-C'の気流分布より、大きい海水槽の上部において、吸込口周囲の領域以外で直接吸込口に向かう気流は見られない。断面D-D'の気流分布より、吸込口と大きい海水面の鉛直距離が1.3mと近いので、吸込口の直下では、海水面から高さ0.6m以上で空気が吸込口へ直接向かっている。また、吹出口がある図の右から吸込口へ一方向に流れている。

2.2 海面上の代表2地点で発生する海塩粒子の移動経路と吸込口の回収率

図5に海面上の代表2地点から発生した粒径0.5μmの海塩粒子の発生から300s後までの軌跡の流線をそれぞれ示す。各発生点から発生する海塩粒子数は同じであるため、示している流線の本数は全て同じ(40本)である。吸込口近傍の地点iで発生した海塩粒子は、海面上の上昇気流によって上昇後、吸込口に誘引され(図4のD-D'断

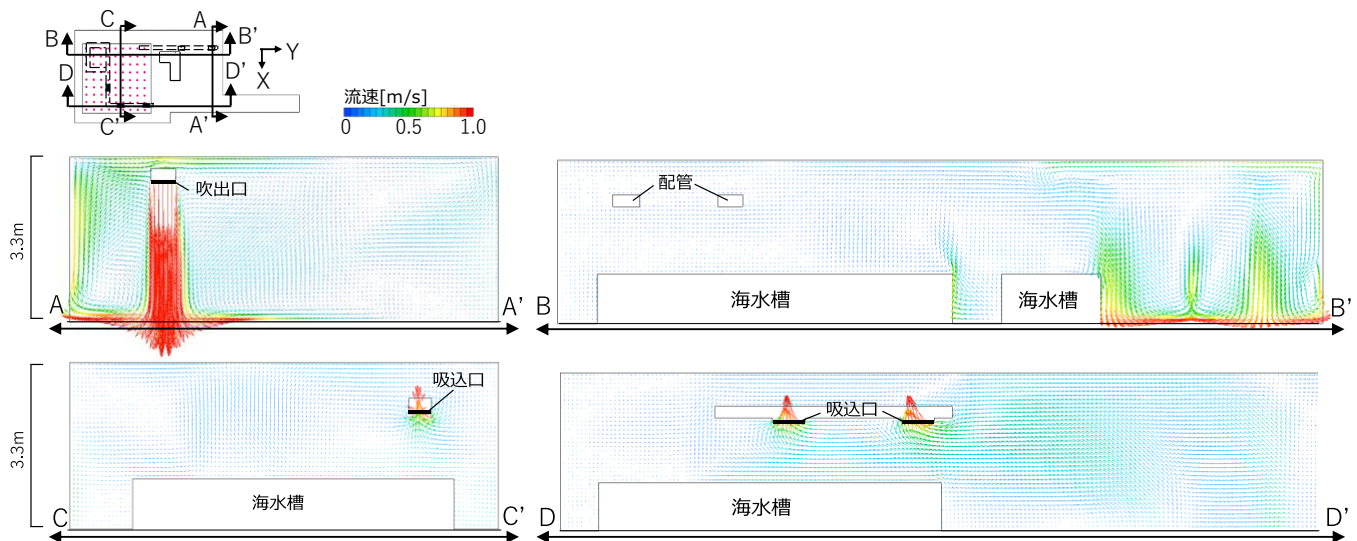


Fig.4 (top left, top right, bottom left, bottom right) indoor airflow distribution in cross sections A-A', B-B', C-C', D-D' (See floor plan at upper left.)

面)、気流を乱す要素がないため流線は散らばることなく、発生後60~70sで吸込口に到達している。小さい海水槽の吹出口からの吹出気流に最も近い地点 ii で発生した海塩粒子は、吹出気流により小さい海水槽付近に形成される循環流や、吹出気流が床沿いから海水槽の下部に衝突してできる上昇気流の影響(図4のB-B' 断面)で、周辺に広く拡散し浮遊時間が長くなり、発生後120s以降で吸込口に到達している。発生から300sまでにおける地点 i、ii で発生した同量の粒子のうち、吸込口に回収された割合はそれぞれ100%、62%であった。また、粒子の粒径が大きくなると、重力沈降や空気抵抗の影響を受けやすくなるため、流線が散らばりやすく、浮遊時間も長くなり、発生から300sまでに吸込口に回収される割合が10~20%小さくなった。

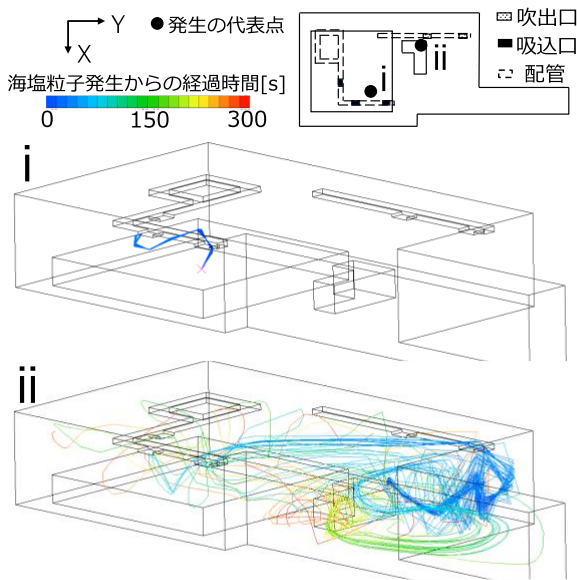


Fig.5 Diffusion behavior of sea salt particles (0.5 μm in diameter) generated at two representative locations on the sea surface.

2.3 海水面から発生したすべての海塩粒子の行方

海水槽から発生したすべての海塩粒子の室内における詳細な分布を検討するために、海塩粒子の発生を1秒間のみとした解析を行い、吸込口へ回収される数、床面・海水面への沈着する数、配管や壁面に付着する数、海面上の3領域(図6参照)に浮遊している数、その他の領域に浮遊している数の推移を図7に発生した海塩粒子の粒径別に示す。粒径0.1、1μmの場合、発生から600sまでの行方の推移がほとんど同じである。発生直後に海面上0.05~0.8mの高さに浮遊する粒子数が多く、その後吸込口に回収される数が多くなっている。発生後600s時点で粒子全体の約90%が吸込口に回収される。床面や海水面への沈着はほとんど見られない。一方、粒径5μmの場合、発生直後に海面上0.05~0.8mに浮遊する粒子数が少なく、床面と海水面に沈着する粒子数が50s以降で緩やかに増加している。発生後600sにおける沈着数は粒径

1μmに比べて10~20倍多い。これより、今回想定した粒径3つの粒子のうち、粒径5μmの場合のみ重力沈降の影響が大きく、床面や海水面への沈着数が増加することが示唆される。

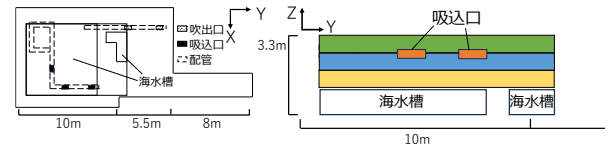


Fig.6 Schematic diagram of three areas above sea level.

(left: plan view, right: elevation view, each area is 0.75 m high)

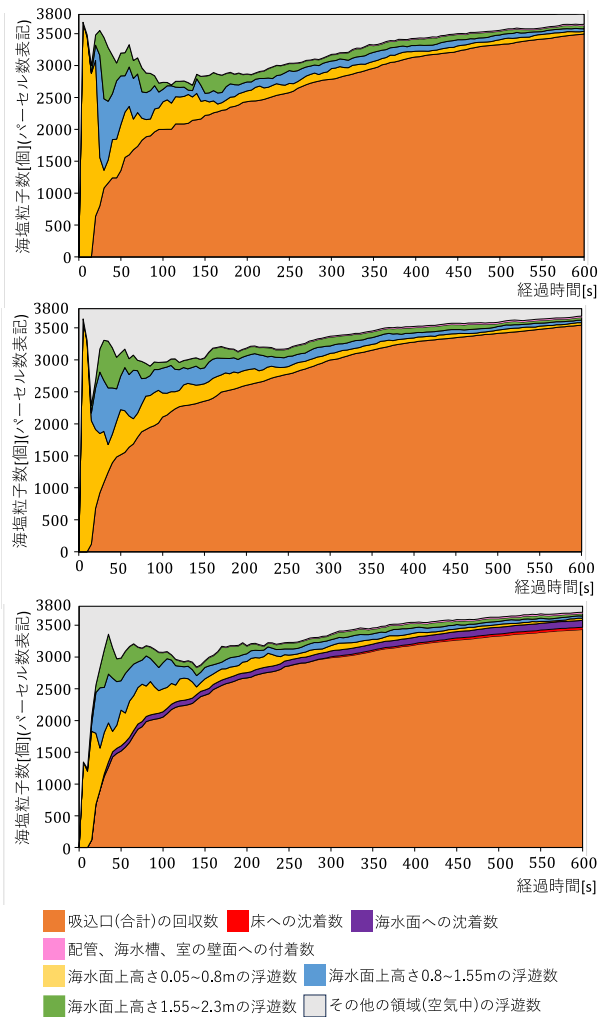


Fig.7 Spatial distribution of sea salt particles generated from the sea surface in 1 second. (from top to bottom: 0.1, 1, 5 μm particle size)

また、配管・海水槽・室の壁面への付着数については、粒子発生後600s時点において各粒径で全体の1~3%を占めている。ここで、実際にサビが見られる金属製配管における付着状況を見る上で、600s時点における配管・海水槽・室の壁面への付着数(配管の位置は図8を参照)について、それぞれの付着位置(上面、側面、下面)ごとの内訳を図9に示す。ただし、付着していない面については表示してい

ない。全体として、配管1、2ともに上面と側面に付着が見られるが、下面にはほとんど付着が見られない。これは、配管1については、流速の大きい吹出气流に管の下面沿いの空気が巻き込まれる影響(図4のA-A' 断面の気流分布を参照)で、配管2については、管の下面にある吸込口により下面沿いを水平气流が流れる影響(図4のD-D' 断面の気流分布を参照)で、管の下面に海塩粒子が付きにくくなっていると考えられる。また、配管2に関して粒径5 μm の粒子が比較的多く付着している。これは配管2が海水面から1.4m上と近くにあることや、天井付近に到達した粒子が配管上に沈降しやすいことが要因として考えられる。対象室のような海水面と配管の距離が1.4mと比較的近い場合、海水面から発生した粒径の大きい粒子であっても配管に付着し、粒径が小さい粒子よりも液滴に含まれる塩分の質量が大きいためサビの発生に大きな影響を与える可能性がある。

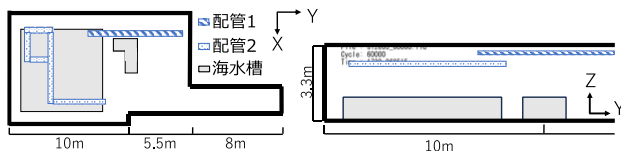


Fig.8 Location of piping and seawater tank (left: plan view, right: elevation view)

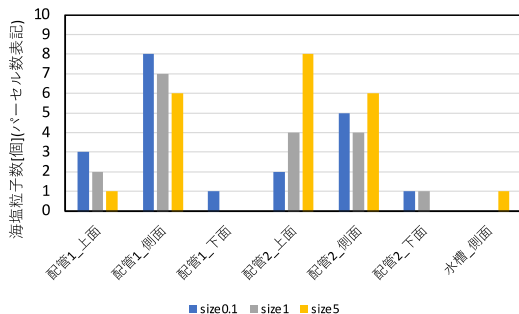


Fig.9 Breakdown of the number of particles adhering to pipes, seawater tanks, and walls at 600s after particle generation. (surfaces with no adherence not shown)

3. まとめ

飼育用海水槽からエアレーションに伴い気中へ飛散する海塩粒子を換気より効率よく除去する方法を検討するために、著者らによる気中塩分濃度の実測実績のある水族館内のバックヤード(冷暖房設備はなく、海水面の上部1.8mに吹出口、1.3mに吸込口がある第1種換気のみ)をモデル化し、海水面からの海塩粒子の発生量の想定値を与え、海水面から発生した海塩粒子(粒径0.1, 1, 5 μm)の行方を数値流体力学を用いて解析した。

- 1) 水槽付近の气流が静穏な状態では、吸込口に近い海水面で発生する海塩粒子は室に拡散することなく、吸込口に到達するが、吹出气流に近く流速・乱れが大

き領域で発生する海塩粒子は広域に拡散し、より長い時間をかけて到達した。発生源付近の気流性状と、吸込口と発生源の位置関係が吸込口の回収率に影響すると考えられる。

- 2) 粒径が小さい海塩粒子(0.1, 1 μm)は発生後海水面の上部に分布し気中に浮遊しやすい一方で、大きい粒径(5 μm)の海塩粒子は重力沈降の影響が大きく、床面・海水面への沈着数が多い。今回の場合、発生後600sにおける沈着数は粒径1 μm に比べて粒径5 μm の場合に10~20倍多かった。
- 3) 配管・海水槽・室の壁面への海塩粒子の付着数については、粒子発生後600s時点でどの粒径においても発生数全体の1~3%を占めており、その内訳は天井付近にある配管の上面と側面がほとんどであった。一方で、配管の下面における付着数は少なかった。

注1) 対象室全体における海塩粒子の発生量Mは、対象室内の3地点における気中塩分濃度の実測値⁴⁾をもとに、室の塩分収支(式(1))より逆算し同定した(M=6.6 $\times 10^{-9}$ kg/s)。海水面積が今回の想定と一致しているため、Mが海水面全体で均一に発生している(図2の計95点の発生点で、1点当たりM/95 kg/s発生する)として与えている。

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\{-\rho_i Q(C_i(t) - C_o(t)) \times 10^{-9} + M\}}{3600V_i} \quad (1)$$

C_i は測定した室内の気中塩分濃度[ppb]、 C_o は外気の塩分濃度[ppb]、 ρ_i は空気密度[kg/m³] (=1.2)、 Q は室換気量[m³/h] (=6,000)、 V_i は室の気積[m³]、 M は室内の塩分発生量[kg/s]、 t は時刻[s]である。壁面への塩分の吸着や床への沈降は無視した。対象室には外気につながる開口が開いているが、無視した。

注2) 解析の計算負荷を減らすために、粒子を一つひとつ解くのではなく、事前に近くに存在する粒子はほぼ同じ挙動をとると考えて、近傍の粒子群を一つの粒子でまとめて代表させ初期条件として与える。まとめた後の粒子数をパーセル数と呼ぶ。

参考文献

- 1) 河内孝夫, 2010, 水族館の電気設備について, 電気設備学会誌, 30(7):40/44.
- 2) 原修一, 三浦正純, 内海靖, 藤原俊明, 山本雅貴, 2005, 耐候性鋼さび性状に及ぼす凍結防止剤の影響, Zairyo-to-Kankyo54 巻7号, pp. 337-343.
- 3) 三浦和彦, 2007, 海塩粒子の生成と化学・物理的性質, 日本海水学会誌, 61(2):102/109.
- 4) 岩島大季, 高田暁, 天野健太郎, 谷英明, 野村佳緒里, 前田龍紀, 上田真也, 山本剛志, 松永知大, 2023, 沿岸部水族館室内における気中塩分に関する研究, 人間-生活環境系シンポジウム報告集 47 巻, pp. 155-158.
- 5) 角脇 怜, 1991, 大気中の海塩粒子, エアロゾル研究, 6(2):113/120.