第 II 部門　　火星上の居住施設における水流とガス輸送特性に関する基礎的研究

京都大学防災研究所　正会員　○山上　路生
京都大学防災研究所　非会員　中本　幹大
鹿島建設株式会社　非会員　大野　琢也
京都大学工学研究科　学生員　天崎　秀俊

1．はじめに

ルナグラス，マーズグラスは，鹿島建設株式会社と京都大学が共同研究を進めている月面及び火星の居住施設である．この構造体を鉛直軸で回転させることで，内壁面に 1G の領域を生み出す．また環境創出や放射線防御を目的に施設内の水域整備も構想されている．そのため，回転時の水流特性やそれに伴うガス輸送を明らかにする必要がある．本研究では、基礎段階としてマーズグラスの卓上模型を使って予備実験を行い，これらを検討した．

2．実験方法

(1) 実験模型　マーズグラスの相似模型を 3D プリンタで製作した．最大径は 25cm で実機の 1/800 サイズである．断面形状は模型底面中心を原点とする 2 次関数で表せ，その係数は 9.8m^{-1} である．回転制御は電動ろくろ（ニデック製 RK-5T 型）を用いた．図-1 のように、計測内容に応じてカメラ（GOPRO）やエアダスターを取り付けた．静止時に中心水深が 6cm（水面の半径 7.7cm）になるように模型に給水した．火星重力を想定すると，地上実験では模型上端において 3G の遠心力を与える必要がある．これに相当する 1.37Hz で回転させると，回転中心で水深が 7mm 減少した．また内壁に沿って水位が 2cm 上昇し，水面半径は 8.0cm となった（図-2）．

(2) コリオリ効果の検討実験　模型にカメラを下向きに取り付けて回転場を視点とする流れの流況を撮影した．水を白ペンキで着色し，浮遊性の黒色粉体をトレーサーとして散布した．撮影画像を PIV 法で解析して流速分布を求めた．コリオリ効果を検証するために，内壁に沿って設置したエアダスターで水面に噴流を生成した．（図-2）

(3) ガス輸送実験　空気層の酸素の水層への輸送効率は再曝気係数とよばれ，マーズグラスやルナグラスの内部環境を評価する上でも重要な指標の一つである．再曝気係数は全層法 [1]で計測した．まず、亜硫酸ナトリウムを水層に少量添加して十分攪拌すると，水層の溶存酸素濃度がほぼゼロとなる．DO 計測には Presens 社の MicroX4 を用いた．停止時にプローブを回転軸に沿って水面下 3cm に設置し，1 分ごとに溶存酸素濃度を記録した．この状態で模型を基本回転数で回転させると，次節で説明するように水中の溶存酸素が時間的に増加する．全層法ではこのカーブを非線形フィットさせて再曝気係数を求める．

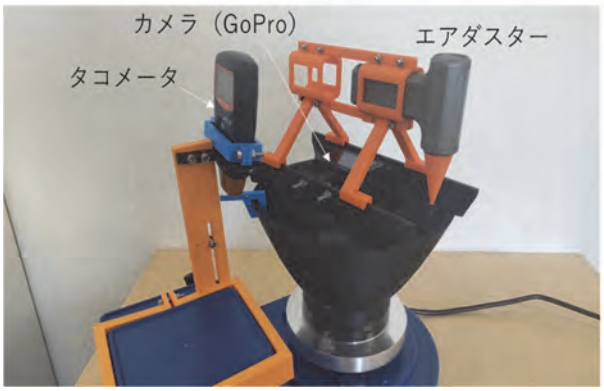


図-1　実験装置の外観

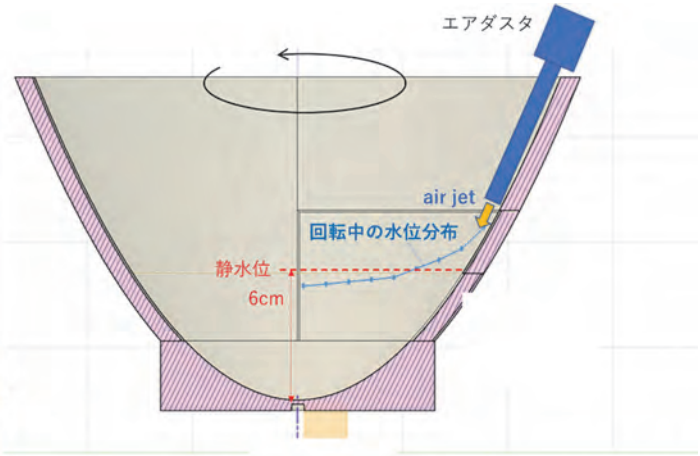


図-2　回転中の水位分布

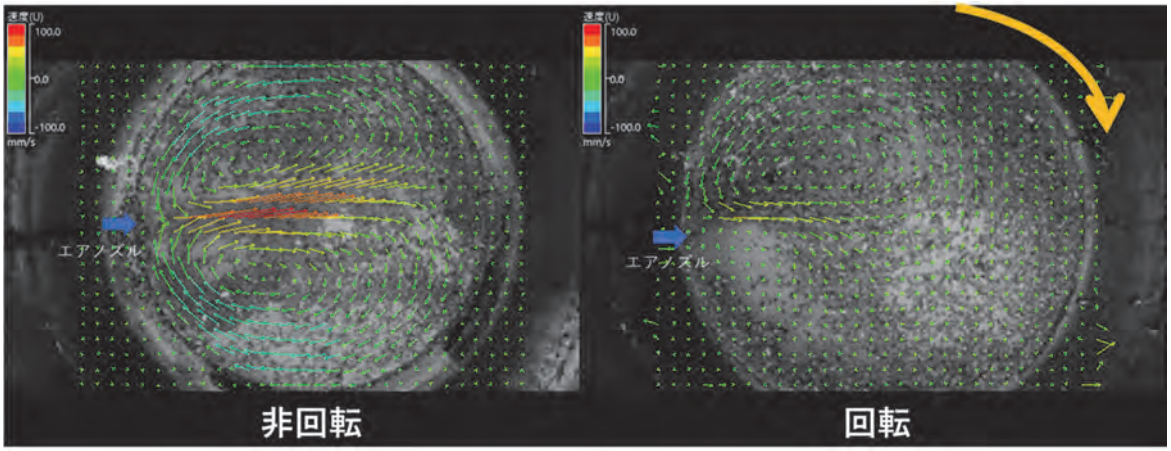


図-3　非回転場と回転場における水面流速分布（エアダスタによって噴流を生成）

3．結果と考察

(1) コリオリ効果の検討　図-3 に非回転場と回転場の時間平均した流速分布を示す．静止場（非回転場）では，エアダスターの気流によって水面場に噴流が生成する．それに誘起された大きな循環のペアが形成される．一方，模型を回転させると回転方向とは反対方向の循環が顕著となり，コリオリ効果によって静止場と特性が変わる．回転場で一定流速をもつ流れが生じるとコリオリ力によって、流向が変化することに注意が必要である．換気循環のための気流やそれによって誘発される水流は、コリオリ効果を受け、回転体内の環境に大きな影響を与えることが予想される．

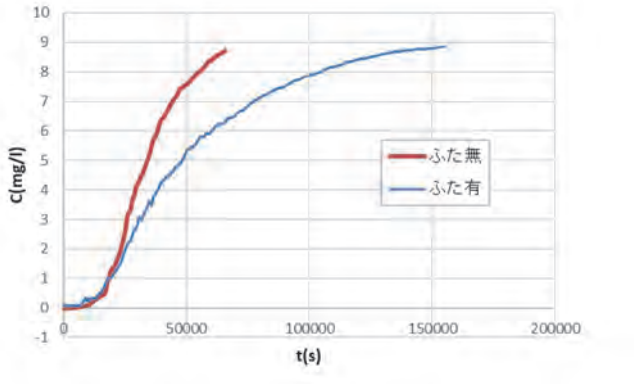


図-4　蓋の有無による溶存酸素の時間回復の比較

(2) 溶存酸素のガス輸送速度（再曝気係数）　模型の上面に蓋をつけた場合とつけない場合の比較を行う．蓋は円盤状で，DO 計プローブとガスを通すための小孔が中心にある．図-4 は蓋の有無の 2 ケースの溶存酸素濃度の時間変化である．蓋無は蓋有よりも酸素濃度の回復が早い．再曝気係数 は蓋無で 4×10^{-5} (1/s)、蓋有で 2×10^{-5} (1/s) となり，蓋無では酸素の輸送効率が蓋有の 2 倍となった．この理由として蓋による気流への影響があげられる．蓋がない場合，模型上面では複雑な気流運動が生ずる．模型内部では内壁摩擦により空気は構造体とともに回転し，回転体の視点場からは気流の動きはほぼないようにみえる．一方で上面より上は構造体による拘束を受けないため，回転体の視点からは気流が逆回転しているようにみえる．すなわち同じ視点場からみると上面では鉛直方向に大きな流速勾配が生じる．このような状態ではせん断不安定性によって渦が発生することが予想され，鉛直方向の物質輸送を促進している可能性がある．その結果，蓋無では蓋有よりも再曝気係数が大きくなったと思われる．

4．おわりに

今後は，本研究をベースにして，直径 2m にスケールアップした大型模型による水流解析，熱・ガス輸送の計測，構造体の回転振動解析やその抑制法の研究を行う予定である．

参考文献 1) 齋藤ら(2025)，潜堤砕波によるガス輸送の促進機構に関する基礎水理実験，土木学会論文集（特集号）81，: 24-16145.

Michio SANJOU, Mikihiro NAKAMOTO, Takuya ONO and Hidetoshi AMASAKI
sanjou.michoi.6c@kyoto-u.ac.jp