

多孔質媒体中のナノバブル輸送挙動へのコロイド粒子の沈着の影響 Effects of deposited colloidal particles on nano-bubble transport in porous media

○杉本卓也*, 濱本昌一郎*, 西村拓*

Takuya SUGIMOTO*, Shoichiro HAMAMOTO*, and Taku NISHIMURA*

1. はじめに

近年, 直径 100 nm 程度の微細な気泡であるナノバブル (以後, NB) を含む NB 水の土壌環境への適用が注目されている. NB はその小さな気泡径に起因する大きな比表面積と表面に帯びた負電荷のために, 気液界面で高い吸着能を有することから, NB 水の汚染土壌への注入による浄化処理が検討されている. このような浄化処理の実施を検討する際, 実際の土中に存在している粘土鉱物や有機物, 金属酸化物といったコロイド粒子との物理化学的な相互作用が土中の NB の挙動に影響を与えることが考えられる. しかしながら, コロイド粒子が存在するような条件下における多孔質体中の NB の輸送挙動に関する研究例は少なく, その理解は不十分である.

土中にコロイド粒子が存在する条件を模擬する方法として, カラム充填試料に予めコロイド粒子を沈着させておくことが考えられる. そこで本研究では, ガラスビーズを充填したカラムへコロイド粒子および NB を逐次的に注入する通水実験を行うことで, 多孔質体へのコロイド粒子の沈着が NB の輸送挙動に与える影響を明らかにすることを目的とした.

2. 試料と方法

2.1 試料 実験には, NB 水として加圧溶解法による NB 製造装置 (FZ1N-10-1, IDEC 社) を用いて作成した O₂NB 水を用いた. また, モデルコロイドとして, カルボキシルラテックス (CL) 粒子を用いた. O₂NB 水および CL 粒子懸濁液を NaCl 1 mM かつ NaHCO₃ 0.4 mM となるように調製し実験に用いた. 調製した試料溶液の気泡あるいは粒子数密度および平均直径を共振式質量分析計 (Archimedes, Malvern) により測定した. 得られた O₂NB 水の平均気泡径は約 180 nm, CL 粒子の平均粒径は 560 nm であり, 気泡数密度は $1.3\sim 1.5 \times 10^5$ 個/mL, 粒子数密度は $8.6\sim 8.8 \times 10^5$ 個/mL であった. 作成した各試料溶液の pH は約 pH 7.6 であった. また, カラム通水実験に用いる充填試料には, 70%硝酸に 24 時間浸漬および超音波洗浄により十分に洗浄した平均粒径 0.1 mm のガラスビーズを煮沸した後に用いた.

2.2 方法

直径 5 cm, 高さ 6.05 cm のアクリル製カラムに, 乾燥密度 1.57 g/cm³, 間隙率 0.37 となるようにガラスビーズを水中充填した. Fig.1 にカラム通水実験に用いた実験装置の概略図を示す. 通水フラックスは 6.2×10^{-3} cm/s に設定した. CL 懸濁液および NB 水と同じ 1 mM NaCl, 0.4 mM NaHCO₃ に調整した水溶液 (バックグラウンド水溶液, pH=7.6, EC=170 μS/cm) をカラムの下端から上端へと流出液の pH, EC が安定するまで通水した. 次いで, NB 水あるいは CL 懸濁液に切り替えて, 約 5 PV (PV: 流出液量/間隙体積) 通水した後, 再度バックグラウンド水溶液に切り替え, 約 3 PV 通水した. さらに, 先に NB 水を通水した場合は CL 懸濁

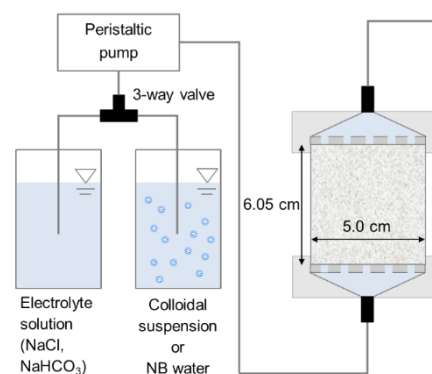


Fig.1 Schematic view of column setup

*東京大学大学院農学生命科学研究科 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

キーワード: ナノバブル, コロイド粒子, 沈着

液を、CL 懸濁液を通水した場合は NB 水を同じく約 5 PV 通水した。

カラムからの流出液を約 0.3 PV ずつ採水し、流出液量、電気伝導度 (EC)、pH、濁度、気泡数密度、粒子数密度を測定した。ここで、濁度は濁度計 (HI 98703, Hanna Instruments) により測定した。本実験では、濁度と気泡あるいは粒子数密度の間に高い相関関係が認められたことから、本研究では気泡数密度ならびに粒子数密度について濁度により間接的に評価した。

3. 結果と考察

Fig.2 に、流出液中の CL 粒子および O₂NB の相対濁度と PV の関係を示す。ここで、相対濁度は流出液の相対濁度を、Fig.2 (a)では流入させた CL 懸濁液の濁度、Fig.2 (b)では流入させた NB 水の濁度で除した値である。図中のプロットで色塗りが CL 粒子を先に通水した場合、色抜きが NB 水を先に通水した場合の結果である。通水順序の影響を比較するために、横軸の PV は各試料溶液の通水を開始した時点からとなるようにプロットした。いずれを先に通水した場合でも、各試料溶液を注入後約 1 PV 程度で相対濁度が急激に増加し、CL 粒子あるいは O₂NB の流出が見られた。Fig.2 (a)より、先に NB を通水した場合には立ち上がり後のコロイド流出液の相対濁度はおよそ 1.0 となった一方で、先にコロイド粒子を通水した場合には相対濁度は 0.8 程度でほぼ一定の値を示した。これは NB の沈着が CL 粒子の流出を促進したことを示唆している。次に Fig.2 (b)より、先に NB 水を通水した場合には、立ち上がり後の流出液の相対濁度が約 0.6 に達したが、先に CL 懸濁液を通水した場合には、相対濁度はおよそ 0.2 までしか増加しなかった。すなわち、カラム充填試料への CL 粒子の沈着が O₂NB のカラム内への捕捉率を増加させたといえる。この結果は、先にガラスビーズ表面に沈着した CL 粒子が疎水性相互作用により O₂NB の新たな吸着サイトとして作用し、O₂NB の沈着を促進したためだと考えられる。

4. 結論

先にコロイド粒子を通水した場合と比較して、NB 水を先に流入させた場合にはコロイド粒子の流出が促進された。また、先にコロイド粒子を通水させた場合には、先に NB 水を通水させた場合と比較して NB のカラム内への捕捉率は増加した。これは沈着したコロイド粒子が疎水性相互作用を介して NB の新たな沈着サイトとなったためだと考えられる。

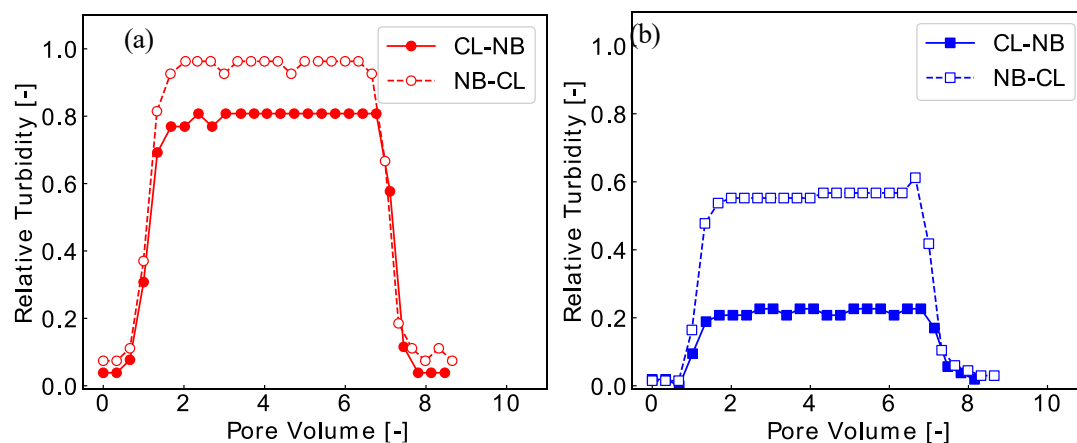


Fig.2 コロイド流出液 (a) およびナノバブル流出液 (b) の相対濁度と PV の関係. The relative turbidities of effluent for colloidal particles (a) and nanobubbles (b) against pore volume (PV). Closed and open symbols are results for experiments of subsequent injection of nanobubbles after injection of colloids and the one of colloids after injection of nanobubbles, respectively.

謝辞 本研究は文科省卓越研究員事業、JSPS 科学研究費助成 (16H04411, 18H01530, 18J00823) の補助を受けました。ここに記して謝意を表します。