氏　　名	MOUSSA SIDDO ABDOULKADER
授 与 学 位	博士（工学）
学 位 記 番 号	博甲第241号
学位授与年月日	令和8年9月8日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
学位論文題目	Evaluation of Ionic Activity Coefficient Effects on Nutrient Diffusion in Brackish Intertidal Sediment Porewaters （汽水域干潟堆積物の間隙水中における栄養塩拡散に及ぼすイオン活量係数の影響評価）
論文審査委員	主査　教　授　中村　大 准教授　駒井　克昭 准教授　チョン　イルウォン 准教授　南　尚嗣 准教授　白井　秀和

学位論文内容の要旨

Intertidal flats are dynamic coastal environments where nutrient transport is controlled by complex physical, chemical, and biogeochemical processes. However, nutrient transport in saline and brackish porewaters in such environments is often modeled using the advection–diffusion equation with concentration-based Fickian diffusion laws, without explicitly accounting for non-ideal solution behavior. The aim of this study is to evaluate how physicochemical conditions influence the diffusive transport of major nutrients: nitrate (NO_3^-), ammonium (NH_4^+), and phosphate (PO_4^{3-}) in the intertidal flat sediments of Lake Komuke, a brackish coastal lagoon in northeastern Hokkaido, Japan.

This study integrates field-based physicochemical analysis, thermodynamic activity modeling, modified Fickian flux estimation, and one-dimensional numerical diffusion simulation. Ionic strength was calculated from measured porewater chemistry at different stations and depths across a mild-slope intertidal flat, and activity coefficients and nutrient activities were subsequently estimated using the semi-empirical Pitzer model. The physicochemical analysis reveals that salinity-driven ionic strength is the predominant depth-dependent control factor for nutrient mobility, whereas temperature exerts only a minor influence during the studied period. Activity-coefficient analysis shows that PO_4^{3-} exhibits the strongest non-ideality, whereas NO_3^- and NH_4^+ exhibit moderate deviations.

To compare diffusive flux under ideal and non-ideal solutions, a modified Fick's first law with an activity coefficient-based correction factor was employed. Although the classical and modified fluxes were generally consistent, localized differences reflected the influence of non-ideal solution behavior under high ionic strength conditions.

Finally, the classical and modified forms of Fick's second law were applied to simulate one dimensional diffusive transport of nutrients in intertidal sediments. The simulations demonstrated that the modified model produced concentration profiles generally consistent with the classical model, while revealing small but systematic differences attributable to non-ideal solution behavior under high ionic strength conditions, thereby quantifying the influence of non-ideal solution behavior on nutrient diffusion.

Although this study focuses only on molecular diffusion, the proposed framework provides a thermodynamically consistent basis for incorporating non-ideal solution behavior into coupled transport–reaction models. This framework facilitates the future development of process-based models that integrate advection, dispersion, and biogeochemical reactions in intertidal sediments.

審査結果の要旨

本論文は、汽水性干潟堆積物間隙水における栄養塩輸送を対象として、塩分およびイオン強度が栄養塩拡散に及ぼす影響を熱力学的観点から検討するとともに、活量係数を考慮した修正 Fick 拡散モデルを提案し、その適用可能性を評価したものである。対象地域には北海道北東部のコムケ湖干潟を選定し、現地観測、熱力学解析および数値シミュレーションを組み合わせた研究を行っている。本研究では、間隙水中の塩分、イオン強度および栄養塩濃度を解析し、Pitzerモデルを用いて硝酸イオン、アンモニウムイオンおよびリン酸イオンの活量係数と活量を評価した。その結果、高イオン強度環境では栄養塩が非理想溶液として挙動し、活量係数を考慮することによる影響を定量的に評価した。さらに、活量係数に基づく補正係数を導入した修正 Fick 第一法則を提案し、従来法との比較を行った結果、高イオン強度条件では局所的な差異が生じることを示した。また、修正 Fick 第二法則による一次元数値モデルを構築し、従来モデルとの比較を通して、その適用可能性を検討した。本論文は、干潟間隙水中の栄養塩輸送に熱力学的活量の概念を導入し、現地観測、熱力学的解析および数値シミュレーションを統合した評価手法を提示したものである。高イオン強度環境下における栄養塩輸送解析および従来モデルの適用性に関する有用な知見を与える研究として評価できる。

以上のことから、申請者は博士（工学）の学位を授与される資格があると認める。