

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540466

研究課題名(和文) 寒冷地汽水湖における湖底堆積物の形成過程の解明

研究課題名(英文) Sedimentation process on organic settling matter in brackish lake in cold region

研究代表者

駒井 克昭 (Komai, Katsuaki)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：90314731

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：粒度分布測定と粒子の沈降現象をモデル化し、粒度分布の経時変化から沈降速度を求める新しい解析的手法を考案した。粘土鉱物と分散剤を用いた実験より、その手法が検証された。道東地方の湖底堆積物の沈降速度は、強熱減量とC/N比を用いた有機物質の指標を用いたモデルを適用すると、沈降速度が大きい傾向にあり、有機物質の違いや溶媒の水質の違いが有機泥の沈降特性に影響を及ぼしている可能性が示唆された。同じ道東地方の汽水湖であるコムケ湖においても懸濁粒子の沈降速度分布の違いが顕著であり、湖内の場所的な海水交換性に起因する生物活動や有機物質の違いが生じた結果、沈降速度と凝集性に影響を及ぼしていることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Measuring of particle size distribution and modeling of particle settling were conducted, and new analytical method on settling velocity distribution from temporal variation of particle size distribution was proposed. From the results of settling experiment by using clay mineral and dispersing agent, the reliable data were obtained. Settling velocity of lake sediment estimated from the model by using ignition loss and carbon/nitrogen ratio was slightly larger in the east of Hokkaido than in the temperate region. The differences of organic matter and solvent influences settling properties of organic settling matter. In Lake Komuke, the settling velocity distribution of organic settling matters also prominently differs. Settling velocity and flocculation were closely related to organic substance depending on seawater exchange rate in the brackish lake.

研究分野：水環境工学

キーワード：沈降速度分布 解析的推定手法 有機懸濁物質 有機物質 ゼータ電位 塩分

1. 研究開始当初の背景

北海道地方などの寒冷地の汽水湖の水環境保全には流入負荷対策に加えて湖底堆積物を起源とする栄養塩類の溶出や貧酸素水塊の形成などの有機汚濁対策が課題である。特に、寒冷地固有の泥炭質土、火山灰質土、畜産排水、畑地、森林、等の様々な起源を有する水と土砂が流入する上、湖底堆積物の形成過程における有機物質の作用に関する知見が不足していると考えられる。

北海道東部地方を代表する寒冷地汽水湖である網走湖は結氷している冬季を除く春季～秋季では明瞭な淡水層と塩水層の二層構造が形成されている(池永ら, 1996)。網走湖には周辺の寒冷地特有の泥炭質土、火山灰質土、畜産排水、畑地、森林などの様々な起源を有する土砂と水が流入し、水環境の悪化が起こっている。さらに、強固な密度界面が形成されるため、塩水層への酸素の供給が少なく、デトリタスが分解される際に酸素が消費されて低層では貧酸素水塊が形成されている。流入する外海水が湖内に長く留まるため、1930年代から塩分躍層が徐々に上昇している。この塩分躍層以深ではほぼ無酸素状態である。淡水層において好气的条件下で富栄養の状態となっているとの報告もある。このような水質状態にあることから、網走湖底にはヘドロ状の堆積物が存在している。低層では堆積物からの栄養塩の溶出が起こっており、長年蓄積されヘドロ化した湖底堆積物による栄養塩負荷と再生産は無視できない。しかし、有機物質を含む懸濁粒子の凝集、沈降、および再懸濁などの湖底堆積物の形成過程は明らかになっていない。これは、汽水湖の水質条件の非正常性や複雑性、堆積物に含まれる有機物質の多様性に原因がある。これらのことから、寒冷地の汽水湖における有機懸濁粒子の挙動と湖底堆積物の形成過程は地域的な特性のために非常に複雑であると考えられる。このため、そのメカニズムを解明し定式化することは、汽水湖の物質循環の理解と水域の管理にとって重要な意味を持つと考えられる。

2. 研究の目的

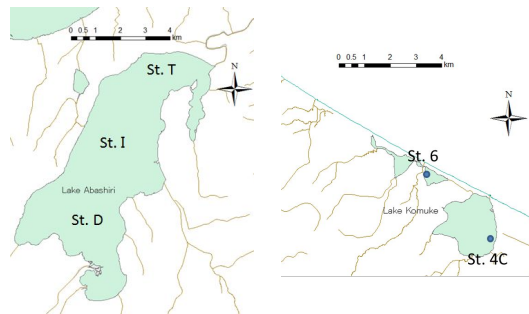
本研究では、寒冷な道東地方に位置する汽水湖の湖底に堆積する有機物質を含んだ泥(有機泥)を用いて、湖底堆積物の形成過程に係る有機懸濁粒子の凝集・沈降現象を解明することを目的とする。まず、有機泥の沈降速度、有効密度の推定を行うための理論に基づいた沈降速度推定のための解析手法を考案し、粘土鉱物の分散性を制御した沈降実験によってその適用性を検証する。次に、汽水湖での堆積物の沈降速度の特性を比較し、有機物質に依存した界面特性を表現した沈降速度モデルの適用性を明らかにする。最後に、有機懸濁粒子に含まれる有機物質、および溶媒に含まれる溶存有機物や塩分が懸濁粒子の凝集性に及ぼす影響についてゼータ電位

を利用して考察する。

3. 研究の方法

(1) 試料採取

道東地方のオホーツク海沿岸の海跡湖である網走湖において、湖心(St. I, 塩水層)、網走川の河口(St. D, 淡水層)、および網走湖出口(St. T, 淡水層)の3地点においてコア採泥を行った(図-1(a))。同時に水面付近と塩淡境界より下の水面から10mの深さで湖水を採取した。採取したコア試料は2cmの層厚でスライスされ、コア試料の表面から2cmの試料を沈降実験に用いた。比較対象としてわが国における重要な渡り鳥の飛来地であり、網走湖と同じく道東のオホーツク沿岸に位置する汽水湖であるコムケ湖の砂質干潟(St. 4C)と泥質干潟(St. 6)においても堆積物を採取し(図-1(b))、同様に沈降実験を実施した。



(a) 網走湖

(b) コムケ湖

図-1 堆積物の採取地点(網走湖, コムケ湖)

(2) 沈降速度の推定法

有機泥を湖水に溶かした実験試料を作成し、レーザー回折式粒度分布計(島津製作所製, SALD-2100)で粒度分布の経時変化を連続測定することで、沈降速度を求める実験(沈降実験)を行った。レーザー回折・散乱法では、粒子群にレーザー光を照射して、その粒子から発せられる回折・散乱光の強度分布パターンの違いから粒度分布を算出する。粒径の測定可能範囲は0.03~1000 μmである。

実験・解析手法を検証するため標準試料として粘土鉱物であるカオリンとベントナイトを用いた実験を行った(case 0A, 0B, および1)。そのうち、case 0Aと0Bではフロックの形成を妨げる分散剤(ヘキサメタリン酸ナトリウム溶液)を溶媒に加え、実験試料とした。case 2~8では採取した有機泥を、それぞれ精製水、水深0mの湖水、あるいは水深10mのEC(電気伝導度)に相当する濃度のNaCl溶液(NaCl水)に十分に混ぜて実験試料とした。実験溶媒についてはpH, EC, 水温、および溶存有機物の蛍光強度を測定した。濁度の測定には透過散乱光比較測定方式の濁度計(Lutron社製, TU-2016)を用いた。溶存有機物(DOM)の蛍光分析には分光蛍光光度計(FP-6200, 日本分光)を用いて3次元励起蛍光スペクトル(EEMs)を測定した後に、DOMの代表的なピーク強度について求め

た．適量の実験試料をビーカーに作成した後、濁度を測定し、次にその試料一部を取ってガラスセルに入れた後、粒度分布を断続的に測定した．粒度分布の測定毎時に、レーザーを照射したときの光強度が記録され、そのセンサーの平均値（平均光強度）を算出した．なお、測定間隔は1分、測定時間は35分とした．平均光強度はSS濃度と線形関係にあることが知られている．本実験試料の平均光強度とSS濃度の関係性を調べるため、異なるSS濃度の溶液を作成し、その平均光強度を測定した．

(3) データ解析手法

既往の研究（西村ら, 2009; 小枝ら, 2010; 他）では粒度分布の経時変化から有機泥フロックの沈降速度分布を推定できることが示されている．本研究では測定値の統計的処理が容易な以下の解析手法によって沈降速度分布を推定した．すなわち、各フロック径での沈降速度は均一、測定セル中の濃度はセル中央で測定された濃度で同様と仮定すれば、基礎式(1)に基づいて沈降速度が求められる．

$$\int_V \frac{\partial C}{\partial t} dV = \iiint_V -w \frac{\partial C}{\partial z} dx dy dz \quad (1)$$

ここに、 x, y : 水平方向の座標軸、 z : 鉛直方向の座標軸、 C : 濃度、 t : 時間、 w : 鉛直方向の沈降速度、 V : 積分領域（セル内）である．セル中の濃度変化が沈降によると仮定して各粒径の濃度変化を表す近似曲線を最小二乗法によって求め、沈降速度を算出した．誤差はRMSEを初期濃度で除した値で誤差を評価し、0.02より大きい粒径のデータは誤差とみなして棄却した．

(4) 実験試料の有機性状と界面特性の測定

有機泥の成分の測定にはPerkin Elmer社製2400IIシステムを利用した．有機泥のIL（強熱減量）は高温電気炉を用いて乾燥試料を約600で加熱した前後の質量変化から求めた．また、沈降実験に用いた実験試料中のフロックの界面特性の指標としてゼータ電位の測定を行った．測定にはレーザードップラー法によるゼータ電位計（大塚電子製、ELSZ-1000）を用いた．

(5) 沈降速度モデル

フロック構造をフラクタル次元で表現することでフロックの沈降速度や有効密度が定式化されている．西村ら（2009）は瀬戸内海沿岸域の有機泥を用いた実験によってある粒径（ D_{fb} ）を境にフロック構造が変化することを明らかにしており、フロック構造が有機物の質（IL, C/N比）に依存する沈降速度モデルを提案している（以下、Model 1とする）．すなわち、フロック粒子の平均有効密度はフラクタル次元Dに依存するが、ある粒径 D_{fb} を境にフロック径 D_f とともに有効密度が減少する．このようにして求められた有効密度からフロックの沈降速度 w_f が求められる．

$$w_f = \frac{g}{18\mu} \Delta\rho \cdot D_f^2 \quad (2)$$

フラクタル次元とフロックを形成する個々の粒子の粒径 d_0 を用いると次のように表せる．

$$w_f = \frac{g}{18\mu} (\rho_s - \rho_w) \left(\frac{D_f}{d_0} \right)^{D-3} \cdot D_f^2 \quad (3)$$

フロック構造が変化しない場合はフラクタル次元Dが定数となる（例えば、Kranenburg; 以下、Model 2とする）．本研究では実験結果に良く一致する d_0 とDを試行錯誤して求め、Model 1と比較した．

4. 研究成果

(1) 分散剤を用いた粘土鉱物粒子による解析手法の検証

粒度分布測定と粒子の沈降現象をモデル化して、粒度分布の経時変化から沈降速度を求める解析的推定手法を考案した．粘土鉱物と分散剤を用いた実験より、その適用性が確認された（図-2）．

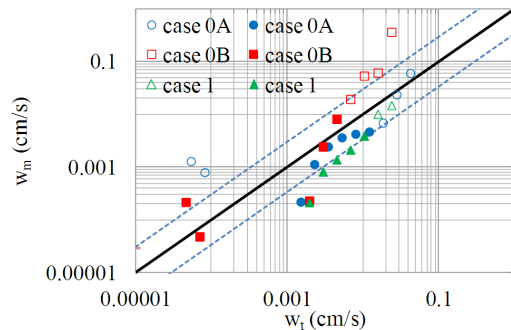


図-2 標準試料を用いた実験での沈降速度の実験値(w_m)と理論値(w_t)．中抜きの記号は5 mg/L未満の低濃度のデータを示す．

(2) 湖底堆積物への解析手法の適用とモデル化

道東地方の湖底堆積物の沈降速度は、強熱減量とC/N比を用いた有機物質の指標を用いたモデルを適用すると、沈降速度が大きい傾向にあり、有機物質の違いや溶媒の水質の違いが有機泥の沈降特性に影響を及ぼしている可能性が示唆された（図-3）．

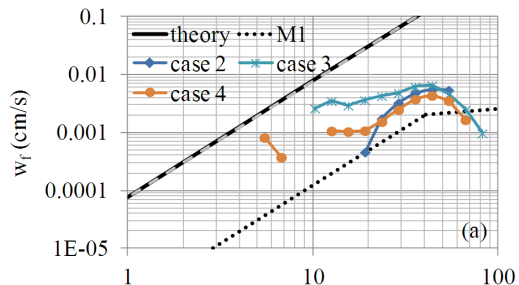


図-3 沈降速度分布の推定結果 (St. I)．太実線：理論値（淡水）、太破線：理論値（NaCl水、図(a)）、点線：モデル値（Model 1）

(3) ゼータ電位による堆積物の沈降・凝集に係る界面特性の考察

網走湖の底泥の場合、溶媒に湖水を用いたケースのゼータ電位の絶対値が 20 mV 以下と粒子の電気的中和が起こっている(図-4(a))。フミン酸様物質の濃度が最も高く、泥に含まれる有機物量も多い St. 1 が最も電気的中和が進んでいる。コムケ湖の底泥の場合、NaCl 溶液に比べて湖水のゼータ電位の絶対値が小さく、海水に含まれる二価の陽イオンや溶解有機物が電気的中和を促進している(図-4(b))。St. 4 においては IL と C/N は網走湖 St. 1 と大差ないものの、凝集性に違いが表れている。同じ道東地方の汽水湖である網走湖とコムケ湖においても、懸濁粒子の沈降速度分布の違いが顕著であり、湖内の場所的な海水交換性に起因する海水性～淡水性の環境が生物活動や有機物質の違いを生じた結果、沈降速度と凝集性に影響を及ぼしていることが明らかになった。

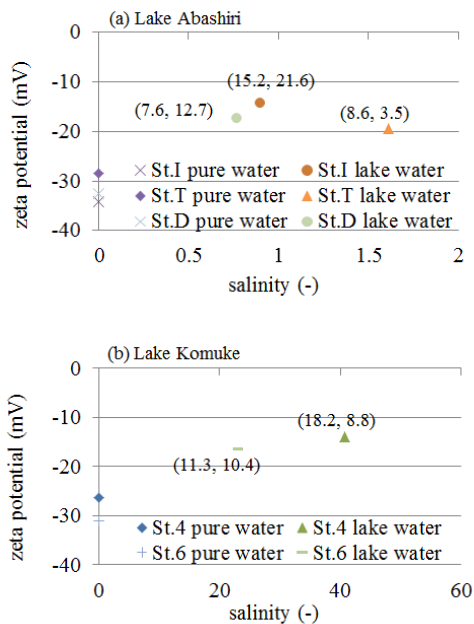


図-4 ゼータ電位と塩分濃度の関係(数値は IL, フミン酸様物質の相対蛍光強度)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 7 件)

吉江祐人, 丸谷靖幸, 中山恵介, 駒井克昭, 新谷哲也, 渡辺謙太, 一見和彦, 桑江朝比呂: コムケ湖における水質及び流動特性の解明, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.70, pp.1185-1190, 2014, 査読有
駒井克昭, 中山恵介, 松原健也, 川口貴之, 山崎新太郎, 渡辺謙太, 一見和彦, 桑江朝比呂: コムケ湖における干潟水質の分布・変動特性に関する検討, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.70, pp.1191-1196, 2014, 査読有
 小窪一毅, 中山恵介, 新谷哲也, 大塚淳一,

渡部靖憲, 柿沼太郎, 駒井克昭, 清水健司: 内部ケルビン波の碎波による水平循環の発達と減衰, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.70, pp.1195-1200, 2014, 査読有

駒井克昭, 日比野忠史, 中下慎也, 戸塚優平, 伊藤立誠, 丸谷靖幸, 中山恵介: 汽水湖における有機泥の沈降速度の推定と界面特性に関する考察, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.70, pp.1585-1590, 2014, 査読有

丸谷靖幸, 中山恵介, 佐々木正史, 新谷哲也, 駒井克昭, 岡田知也, 菅原庸平, 崇田徳彦: 網走湖におけるメタン発生メカニズムの解明, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, pp.1435-1440, 2013, 査読有

Keisuke Nakayama, Tetsuya Shintani, Kazuki Kokubo, Taro Kakinuma, Yasuyuki Maruya, Katsuaki Komai, and Tomonari Okada: Residual current over a uniform slope due to breaking of internal waves in a two-layer system, Journal of Geophysical Research, Vol. 117, C10002, 20012, doi:10.1029/2012JC008155, 査読有

中山恵介, 小窪一毅, 新谷哲也, 大塚淳一, 丸谷靖幸, 渡部靖憲, 駒井克昭, 岡田知也: 内部ケルビン波の碎波により誘起される流れ, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.68, pp.926-930, 2012, 査読有

[学会発表](計 3 件)

撫養雄太, 駒井克昭, 中下慎也: 寒冷地の流域における有機泥の沈降挙動に関する研究, 土木学会北海道支部平成 26 年度年次技術研究発表会, 室蘭市, 2015, 査読無
 伊藤立誠, 戸塚優平, 駒井克昭, 日比野忠史, 中下慎也, 丸谷靖幸, 中山恵介: 網走湖における有機泥の沈降速度の推定と界面特性に関する考察, 土木学会北海道支部平成 25 年度年次技術研究発表会, 2014, 査読無

Komai K., Sugawara Y., Kokubo K., Kato J., Maruya Y., Matsuda W., Kameda S., Ebe R., and Nakayama K.: Investigation of the distribution of dissolved organic matter in an ice-covered brackish lake by using EEMS, ASLO Aquatic Science Meeting, 2012, Shiga, Japan, 査読無

[図書](計 0 件)

該当なし

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

該当なし

取得状況(計 0 件)

該当なし

[その他]

ホームページ等

<http://www.kitami-it.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

駒井 克昭 (KOMAI, Katsuaki)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：90314731

(2) 研究分担者

中山 恵介 (NAKAYAMA, Keisuke)

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号：60271649

中下 慎也 (NAKASHITA, Shinya)

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：90613034

(3) 連携研究者

横山 洋 (YOKOYAMA Hiroshi)

独立行政法人土木研究所・寒地土木研究

所・主任研究員

研究者番号：70442879