

湖沼からのメタン発生機構の解明

CLARIFICATION OF MECHANISMS OF METHANE EMISSION FROM A LAKE

北見工業大学	○学生員	丸谷靖幸	(Yasuyuki Maruya)
北見工業大学	正 員	中山恵介	(Keisuke Nakayama)
北見工業大学	非会員	佐々木正史	(Masafumi Sasaki)
北海道開発局	正 員	崇田徳彦	(Naruhiko Muneta)
北陸地方整備局	正 員	石田哲也	(Tetsuya Ishida)

1. はじめに

近年、地球規模での環境変化が問題となっており、気候変動における政府間パネル（IPCC）第4次報告書では、海面水位の0.18～0.59mの上昇、気温の1.1～6.4℃の上昇が報告されている¹⁾。それに伴い降水パターンが変化することも指摘されている。このような環境変化の原因として二酸化炭素、メタン、一酸化炭素などの影響が取りざたされており、それらの発生要因、発生量を高精度に推定する方法を確立する必要がある。その中で、メタンは大気中の寿命が約10年であり、二酸化炭素の5～200年と比べるとそれほど長くはないが、温室効果は二酸化炭素の約25倍であるといわれているため、大気中のメタン濃度が増加することで温暖化が促進されてしまう可能性がある。さらに、Matthews and Fung²⁾やAselmann and Crutzen³⁾らにより自然湖沼、湿地からのメタン放出量は年間120Tgと全球のメタン放出量の1/4を占める値であり、湿地や湖沼からのメタン放出量を無視することが出来ない状態になっている。

これまでメタンに関する研究は数多く行われており、Bastiviken⁴⁾らは湖沼におけるメタン放出過程を水表面からの噴出、水表面からの拡散放出、水中での貯留とし、現地観測結果を基に水表面からの拡散放出量を推定する式を作成することで、それぞれの放出量の推定を行い、湖沼からのメタン放出は水表面からの噴出が主であると報告されており、Kekker and Fung⁵⁾ではメタン放出の98%は水表面からの噴出であると報告されている。Wanninkhof⁶⁾は現地観測結果を基に、湖水から大気へのメタンフラックスを推定しており、同様な手法を利用し、吉田⁷⁾らは寒冷地域に存在する洞爺湖を対象とし、湖沼から放出されるメタンフラックスについて検討している。しかし、これらの研究は現地観測結果を基に湖沼から放出されるメタンフラックスを推定しているのみであり、物理的に湖沼から発生するメタンフラックスを推定する方法が明らかとされておらず、地球規模で生じている環境変化の要因の1つとされているメタンの発生量を正確に推定するためには既往の研究のみでは不十分である。

そこで本論文では、メタンの発生過程、発生量を推定

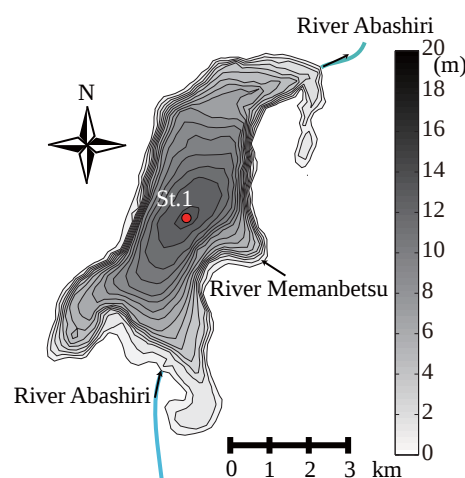


図-1 網走湖（赤丸：採水地点）

可能な数値モデルを開発することを最終目的とし、簡便な手法である鉛直1次元モデルを作成することで、これまで行われていなかった湖沼からのメタン発生過程について基礎的検討を行うことを目的とする。本研究では、富栄養化が問題となっており、環境変化の影響を受けた場合、現在以上に富栄養化が生じ、多くのメタンを放出してしまう可能性がある網走湖を対象とした^{8),9)}。

2. 網走湖のメタン濃度測定結果について

2.1 メタン濃度及び水質測定方法について

本研究では、過去の研究において行われている2009年～2010年の期間における測定結果を利用することとした¹⁰⁾。本研究では最深部である図-1におけるSt.1において溶存メタン濃度（以下DM濃度とする）の鉛直分布を確認するため、各層毎の採水を行っている。それぞれの地点におけるDM濃度の測定にはFID（Flame Ionization Detector）付きガスクロマトグラフ（SHIMADZU GC-14BPF）を用いた。

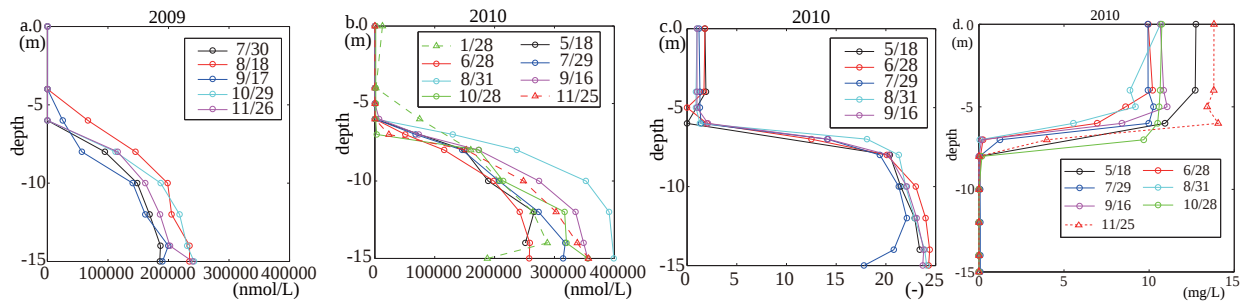


図-2 最深部である St. 7 における鉛直分布. a:2009 年における DM 濃度, b:2010 年における DM 濃度, c:2010 年における塩分濃度, d:2010 年における DO.

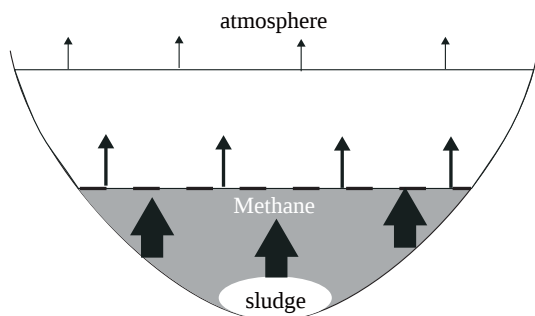


図-3 湖沼から生じるメタン発生概要図(参考文献⁴⁾を参考). 矢印はメタンの移動を表す.

2.2 メタン濃度及び水質測定結果について

湖央である St.1 における DM 濃度, DO, 塩分濃度の鉛直分布の比較を行った(図-2). DO, 塩分濃度の結果を見ると 2010 年には約 6m 付近に密度界面が存在していたことが分かる. DM 濃度と DO の図を比較すると, DO が高い位置では DM 濃度が低く, DO が低い位置では DM 濃度が高いといった関係を示していることが分かる. また, DM 濃度と塩分濃度の結果を比較すると, 網走湖は成層が強固であることから, 塩分層は無酸素層であり嫌気の状態が非常に強く, メタンを生成するメタン生成菌は嫌気状態で活動するため, DM 濃度は塩分濃度と同様な傾向を示していると推測される^{11),12)}.

3. 湖沼からのメタン発生量推定モデルの構築

生物起源のメタンは嫌気的雰囲気ではメタン菌が有機物を分解することで副産物として生成されるが, 海水など硫酸イオンが豊富に存在する嫌気的雰囲気では, 硫酸還元菌の有機物分解活動が優位である. 網走湖の塩水層は硫化水素臭を伴い, 硫酸還元菌の活動が明らかである. したがって, 本研究ではヘドロ状の底泥が存在する底層のみでメタンが生成されるものと仮定し, 鉛直 1 次元モデルを作成した(図-3, 式(1)). なお, 密度界面位置が図-2 において 6m よりやや下部に存在したため, 密度界面位置を 6.5m とし計算を行った.

$$\frac{\partial DM}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial DM}{\partial z} \right) + DM_0 - DM_a \quad (1)$$

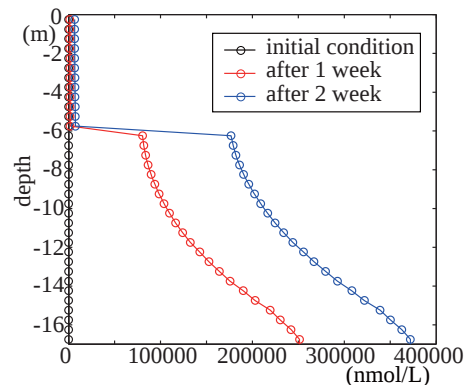


図-4 DM 濃度の再現計算結果. 黒:初期状態, 赤:計算開始から 1 週間後, 青: 計算開始から 2 週間後.

ここで, DM:DM 濃度, v :拡散係数, DM_0 :底泥から生じる DM 濃度, DM_a :湖表面から大気へと放出されるメタンフラックス, $dz:0.5m$, $dt:100s$ である. 密度界面をはさんだ上層と下層の拡散係数は, それぞれ 1.0×10^{-3} と 1.0×10^{-4} とし, 密度界面でのフラックスは 1.0×10^{-6} とした. 湖表面から大気へと放出されるメタンフラックスについては, 過去の研究において湖表面積当たり年平均値が $3.282gCH_4/(m^2 \cdot yr)$ であることが報告されており, その値を利用した. しかし, 厳密には表層における DM 濃度を考慮した式を利用しなくてはならない点を記述しておく.

式(1)を利用して再現計算を行った結果, 観測では上層において DM 濃度がほぼゼロに近い値を示しているにも関わらず, 再現結果では数 1000nmol/L であった(図-4). これは, 生成のみを考慮した式(1)において, 好気環境条件におけるメタンの消費を考慮していなかったためであり, 過去の研究で実施された水温と日射による影響を考慮した好気性微生物によるメタン分解量に関する実験結果を利用し, メタンの消費を考慮することとした¹⁰⁾(図-5). 実験では, 日射が有る場合と無い場合の 2 種類の条件が与えられている. 植物プランクトンは光合成を行うことで酸素を生成し, 好気性微生物は生成された酸素をエネルギー源とし活動するが, 日射が無い場合, 酸素が不十分となり, 好気性微生物はメタンをエネルギー源として活動するため, メタンの分解が促進

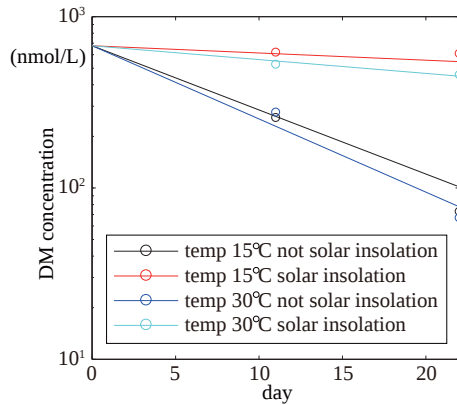


図-5 好気性微生物によるメタン分解量（参考文献¹⁴⁾から抜粋）．黒：気温15°C日射無，赤：気温15°C日射有，青：気温30°C日射無，水色：気温30°C日射有．

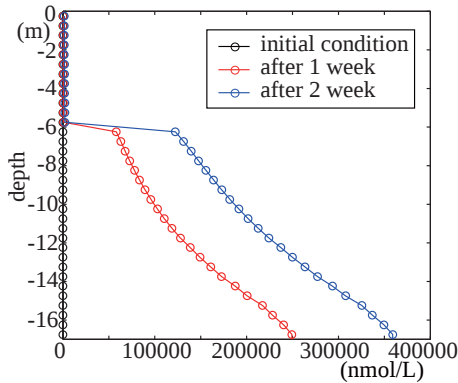


図-6 式(4)，式(5)を考慮したDM濃度の再現計算結果．黒：初期状態，赤：計算開始から1週間後，青：計算開始から2週間後．

されるといった結果が示されている．そのため，日射の有無による影響を考慮する必要があり，初期状態からのDM変化をモデル化すると式(2)，式(3)が得られる．

$$DM_{ds} = DM \times e^{-(0.0097+0.0186) \cdot d / 2} \quad (2)$$

$$DM_{dns} = DM \times e^{-(0.0862+0.0984) \cdot d / 2} \quad (3)$$

ここで， DM_{ds} ：日射有の場合の好気性微生物による分解後のメタン濃度， DM_{dns} ：日射無の場合の好気性微生物による分解後のメタン濃度， d ：経過日数である．

よって，式(1)に追加すべき好気性微生物によるメタン分解量推定項として，式(4)，式(5)を得ることが出来る．モデル中で日射の有無による好気性微生物によるメタン分解の効果を鉛直1次元モデルに考慮するに当たり，天気による影響を考慮せず，1日を昼と夜の2分割し，昼は日射が当たるものとして式(4)を，夜は日射が当たらないものとして式(5)を密度界面より上層に適用することとした．

$$DM_{vds} = -(0.0097 + 0.0186) / 2 \cdot DM \cdot d \quad (4)$$

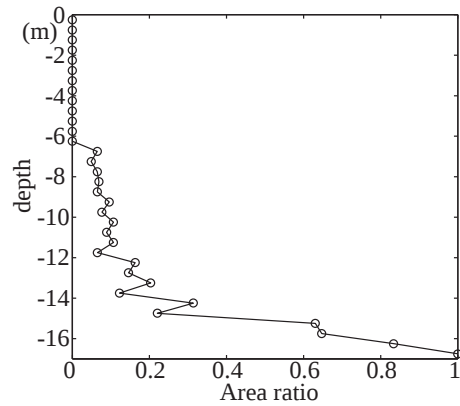


図-7 各層に対する底層の面積割合．

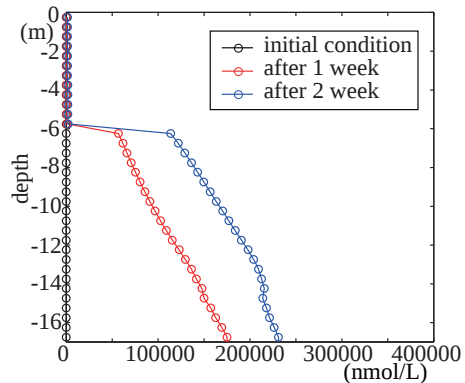


図-8 式(6)を考慮したDM濃度の再現計算結果．黒：初期状態，赤：計算開始から1週間後，青：計算開始から2週間後．

$$DM_{v dns} = -(0.0862 + 0.0984) / 2 \cdot DM \cdot d \quad (5)$$

ここで， DM_{vds} ：日射有の場合の好気性微生物によるメタン分解量， $DM_{v dns}$ ：日射無の場合の好気性微生物によるメタン分解量， d ：経過日数である．

式(4)，(5)を利用して再現計算を行った結果，式(1)を利用した結果と比較すると密度界面におけるDM濃度が減少していることが分かる（図-3，図-6）．しかし，下層におけるDM濃度が実測値のように水深の増加に伴う急激な増加率の減少を再現することが出来ていない．これは，下層に存在する全ての底泥から同じ濃度のメタンが一樣に発生すると仮定しており，各層の面積に対する底層の面積割合が大きいほどDM濃度が大きくなることから，底層付近においてDM濃度が減少する現象が生じていると考えられる（図-7）．

網走湖は約7kmの網走川により海と接合されており，高潮位時に高塩分濃度で低DM濃度の海水が網走湖底層に貫入し，底層の高DM濃度の水塊と混合することでDM濃度が低下しているという現象が確認されている¹⁰⁾．そこで，底層付近における海水貫入によるDM濃度の減少量に関する項を式(6)のようにモデル化し，式(1)に追加することとした．鉛直1次元モデルに考慮するに当たり，観測において14m付近より下層におい

て現象が生じていることから、14m よりやや下部である 14.5m より下層に式(6)を適用することとした。

$$DM_e = \mu \cdot DM \cdot dt \quad (6)$$

ここで、 DM_e ：底層付近で生じる DM 濃度の減少量、 μ ：減少係数である。本研究における減少係数は $4 \cdot 10^{-6}$ とした。

式(6)を利用して再現計算を行った結果、実測値のような分布を再現することが可能となった(図-3, 図-8)。しかし、観測による密度界面の DM 濃度は最大で数万 nmol/L であるのにも関わらず、計算結果では約 10 万 nmol/L と過大評価となっている。そのため、密度界面付近において好気性微生物による分解以外になんらかのメタン消費が生じていると推測される。しかし、これはあくまでも推測であるため、今後引き続き現地観測を含め、検討を行っていく必要があることを記述しておく。今後は、減少係数など物理的にモデル化を行っていない部分について引き続き検討を行う予定である。また、河川の流入による影響を考慮したモデルの作成を行い、3次元数値モデルに組み込むことで、メタンがどのような分布をし、湖沼から大気への放出量について検討を行う予定である。

4. 湖沼からのメタン発生量推定モデルの構築

本研究では、寒冷地域に存在する網走湖を対象とし、湖沼から生じるメタン発生過程に関する解析を行い、以下のような結論を得た。

- (1) DO が高い位置では DM 濃度が低く、DO が低い位置では DM 濃度が高いといった関係性があることが分かった。 DM 濃度は塩分濃度と同様な傾向があることが分かった。これは、網走湖は成層が強固であることから、塩分層は無酸素層であり、嫌気の状態が非常に強く、メタンを生成するメタン生成菌は嫌気状態で活動するため、塩分層内にてメタン生成菌が活発に活動したため、 DM 濃度が高くなったと推測される。
- (2) これまで行われていなかった湖沼からのメタン発生量を再現可能な鉛直1次元モデルの作成に試み、メタン発生過程に関する基礎的検討を行った。その結果、底層からのみメタンが生じ、湖沼から大気へ放出されるメタンフラックスを考慮したのみでは、実現象を再現することが出来ないことが確認された。網走湖の上層は好気的な状態であるため、好気性微生物によるメタン分解、及び現地観測において確認されている、底層付近における DM 濃度の減少の効果を考慮した結果、鉛直1次元モデルを利用することで実測値を再現することが出来た。

謝辞：本研究を進めるにあたり、国土交通省北海道開発局網走開発建設部の協力の下実施されました。本研究の一部は、日本学術振興科学研究費補助金（C：代表中

山）の助成を受け、実施されました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Solomon S., Qin D., Manning M., Marquis M., Averyt K., Tignor M.M.B., Miller H.L. and Chen, Z. eds, Climate Change 2007, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, pp.235-336, 2007.
- 2) Matthews, E., and I.Fung, Methane emissions from natural wetlands:Global distribution, area, and environmental characteristics of sources, Global Biogeochem. Cycles, 1, 61-86, 1987.
- 3) Aselmann, I., and P.J.Crutzen, Global distribution of natural wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality, and possible methane emissions, J.Atmos. Chem., 8, 307-358, 1989.
- 4) Bastviken, D., J.Cole, M.Pace, and L.Tranvik, Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate, Global Biogeochem Cycles, 18, GB4009, 12pp, 2004, doi:10.1029/2004GB002238.
- 5) Keller, M., and R.F.Stallard, Methane emission by bubbling from Gutun Lake, Panama. J.Geophys. Res, 99, 8307-8319, 1994.
- 6) Wanninkhof, R., Relationship Between Wind Speed and Gas Exchange Over the Ocean, J.Geophys. Res., 97, C5 7373-7382, 1992.
- 7) 吉田磨, 林えれな, 吉田剛司, 加藤康大, 室田欣弘, 吉田剛司, 洞爺湖及び流出河川におけるメタンの分布, 酪農学園大学紀要. 自然科学編, 34(1), pp.47-68, 2009.
- 8) 丸谷靖幸, 中山恵介, 堀松大志, 鰐目淑範, 米元光明, 網走湖における密度界面に対する風応力と河川流入の影響評価, 水工学論文集, 第54巻, pp.1393-1398, 2010.
- 9) Maruya Y., K. Nakayama, T. Shintani and M. Yonemoto, Evaluation of entrainment velocity induced by wind stress in a two-layer system, Hydrological Research Letters, Vol. 4, pp.70-74, 2010, doi:10.3178/hrl.4.70.
- 10) 若松亨, 湖沼と大気間のメタン交換過程, 北見工業大学大学院 工学研究科修士論文, 2011.
- 11) Rudd, J.W.M., and R.D.Hamilton, Methane cycling in a eutrophic shield lake and its effects on whole lake metabolism, Limnol. Oceanogr., 23, 337-348, 1978.
- 12) Kankaala, P., J.Huotari, E.Peltomaa, T.Saloranta, and A.Ojala, Methanotrophic activity in relation to methane efflux and total heterotrophic bacterial production in a stratified, humic, boreal lake, Limnol. Oceanogr., 51, 1195-1204, 2006.