

## アラスカ北極圏の湖沼におけるメタンフラックスと永久凍土融解の影響 Effect of the thawing permafrost on methane flux from lakes in the Alaskan Arctic Zone

佐々木正史<sup>1</sup>、内田昌男<sup>2</sup>、近藤美由紀<sup>2</sup>、内海真生<sup>3</sup>、米村正一郎<sup>4</sup>、中山恵介<sup>5</sup>

<sup>1</sup>北見工業大学、<sup>2</sup>国立環境研究所、<sup>3</sup>筑波大学、<sup>4</sup>農業環境技研、<sup>5</sup>神戸大学

### 1. はじめに

アラスカ北極圏（永久凍土地域）における温暖化物質の挙動に関する興味の一つとして、永久凍土中に蓄積されたメタンが温暖化による融解に伴って大気中に放出される量およびそれによる温暖化加速（正のフィードバック）効果が挙げられる。湖沼は十分な規模（大きさと深さ）があると湖底下に不凍土壌（タリク talik）が形成され、年とともに永久凍土を融解して行く（極端な例では永久凍土層が全て融解しいわゆる「底が抜ける」状況も生じる）のに対し、ツンドラ地帯（アラスカではほぼ連続的な凍土地帯）の植生下では地表から 50 cm 程度掘ると永久凍土フロントが現れるなど、LGM 以降の永久凍土融解速度は極めて低い。以上は、湖沼が永久凍土の融解に関してより高活性であり、より高感度のセンサーであることを示唆するものである。従って、湖沼水中の溶存メタン濃度を観測し、さらにこのメタン内、永久凍土由来の比率を  $\delta C_{14}$  年代測定から求めることにより、永久凍土融解速度を推計するという挑戦的な発想の許に GRENE 陸域のアラスカ湖沼研究チームを発足した。

具体的な研究内容としては、ツンドラ地帯（アラスカ北極圏）（＝連続的永久凍土地帯）の湖沼を中心に、湖沼水中の溶存メタンを観測し、非永久凍土地帯のそれとの差異を明らかにすること。また、永久凍土地帯上に形成された湖沼の水中溶存メタンを年代追跡することにより、永久凍土由来のメタン比率を明らかにすること。それに先立ち、水中溶存メタンの高濃縮化&グラファイト化技術および  $\delta C_{14}$  年代測定技術を確立することである。以下に結果の概要を報告する。

### 2. 観測サイトおよび観測結果

アラスカ Dalton Highway 沿線で 2008 年夏期に約 30 湖沼の採水を、2012～2014 年の GRENE プロジェクト内で加えて Richardson Hwy, Denali Hwy, Glenn Hwy 沿線で約 10 湖沼の採水を行い、水中溶存メタン濃度（以下  $DM$ ）を観測した。採水ステーションと解析対象エリアを Fig.1 に示す。図中の○印は採水した湖沼の位置を示す。観測エリアは北からツンドラ地帯、山岳地帯（Brooks 山脈）およびタイガ地帯の 3 つの特徴的な地帯から成る。採取した湖水中の  $DM$  をガスクロマトグラフィー水素炎イオン検出器（GC-FID：島津 GC-8A）により測定した。採水方法や  $DM$  分析方法の詳細は Sasaki and Endo (2014) などと同様である。表層  $DM$  ( $\text{nmol L}^{-1}$ ) を湖沼面積  $A$  ( $\text{km}^2$ ) との相関として Fig. 2 に示す。2008 年夏と 2012 年夏の重複湖沼 (25) の  $DM$  の間には有意の差は認められなかった。アラスカ北極圏のツンドラおよび山岳地帯の  $DM$ - $A$  のトレンドは、スウェーデン及び北米北部の湖沼に対して Bastiviken et al. (2004) によって提案された式(1)によってよく記述される。アラスカのツンドラ地帯は連続した永久凍土に覆われているのに対し、式(1)は永久凍土の存在しないスウェーデン及び北米北部の湖沼に対して求められたものであり、アラスカ北極圏のツンドラでは明確な永久凍土の融解の影響 ( $DM$  強調) は認められない。一方タイガ地帯はツンドラ地帯より表層  $DM$  が有意に高い傾向が認められ、これに対しては式(2)の近似式を与えた。

$$DM = 262.4 A^{-0.227} \quad (\text{Bastiviken et al., 2004}) : \text{ツンドラ地帯 (含む山岳)} \quad (1)$$

$$DM = 652.5 A^{-0.149} : \text{タイガ地帯} \quad (2)$$

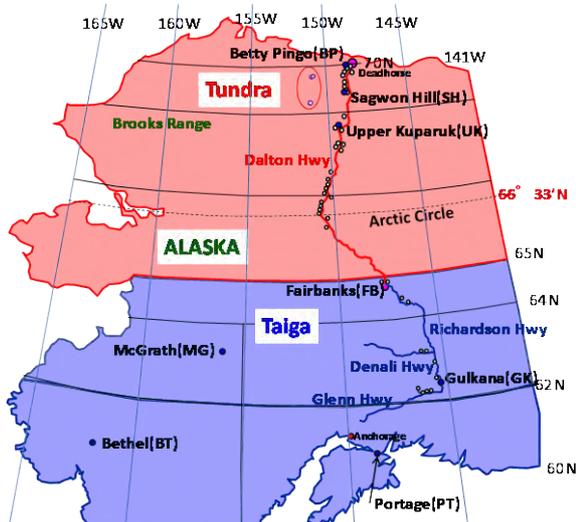


Fig.1 Observation stations and study regions

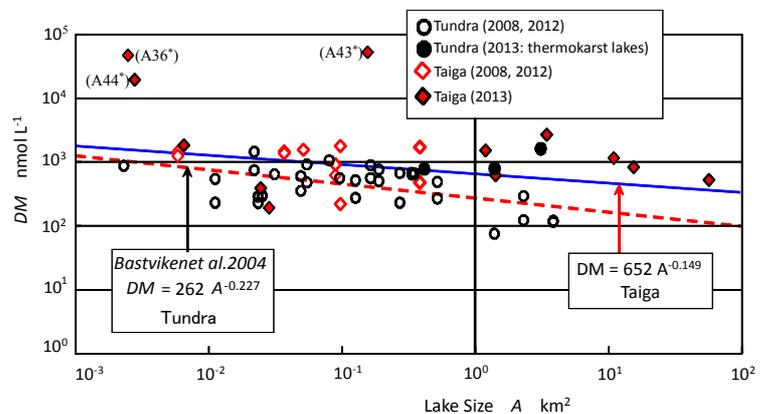


Fig.2 Correlations between lake size ( $A$ ) and dissolved methane concentrations ( $DM$ )

### 3. アラスカの湖沼から大気に拡散するメタンフラックスの推計結果

CO<sub>2</sub>に対する大気-湖沼表層の交換係数  $k_{600}$  (淡水の 20°C の時のシュミット数  $Sc=600$  に対する値) を決定するために、Cole and Caraco (1998) の経験式(3)を適用した。

$$k_{600} = 5.75 \times 10^{-6} + 0.597 \times 10^{-6} U_{10}^{1.7}. \quad (\text{m s}^{-1}) \quad (3)$$

$U_{10}$  は地上 10 m の相当風速で、本計算では時間平均値を用いた。メタンの交換係数  $k_{\text{CH}_4}$  は、メタンのシュミット数  $Sc_{\text{CH}_4}$  から、以下の式(4)および(5)によって求まる。

$$k_{\text{CH}_4} = k_{600} (Sc_{\text{CH}_4} / 600)^{-0.5}. \quad (4)$$

$$Sc_{\text{CH}_4} = v_w / D_{\text{DM}}. \quad (5)$$

湖沼表層から大気への時間平均マスフラックス  $dm/dt$  は、

$$dm/dt = M_{\text{CH}_4} k_{\text{CH}_4} (DM - DM_0) A \times 3600. \quad (\text{g CH}_4 \text{ hr}^{-1}) \quad (6)$$

以上の大気へのメタン拡散の推計方法は、Sasaki et al. (2010)に詳述されている。アラスカ的全観測湖沼において  $DM$  は大気平衡濃度  $DM_0$  (4.7~2.5 nmol/L) を大きく上まわり、湖沼は大気へのメタンソースとなっている。式(6)を各代表気象 Region ごとの湖沼面積および開水期間に対して積分するとアラスカ全土の湖沼のメタンフラックスを推計できる。式(3)に必要な  $U_{10}$ 、式(5)のシュミット数  $Sc_{\text{CH}_4}$  を決めるのに必要な水温および開水期間(気温から推計)など、気象データは代表的な自動気象観測地点のデータを用いた。すなわち、ツンドラ地帯(北緯 64° 以北)については、Betty Pingo (BP), Sagwon Hill (SH), Upper Kuparuk (UK) および Fairbanks (FB), タイガ地帯については Gulkana (GK), Portage (PT), McGrath (MG), Bethel (BT) のそれぞれ 4ヶ所で、Fig. 1 中●印で示した。式(6)中の湖沼面積  $A$  については、地図サイト (<http://maps.google.co.jp>) から入手した地図画像を、二階調化などの画像処理を施した後に、粒子解析ソフト(旭化成エンジニアリング「A 像くん」®)を流用して、湖沼面積  $A$  が 0.001 km<sup>2</sup> 以上の全ての湖沼について、その数と面積の頻度分布を解析した。アラスカ全土の合計湖沼面積は 49,291 km<sup>2</sup> (対象湖沼数約 81 万)となり、そのうちツンドラ地帯は 30%であった。メタンフラックスの月変化の推計結果(2008 年と 2012 年の平均)を Fig. 3 に示す。UK の 5 月と FB の 10 月は開水が半月と仮定しているため、バーの幅を半分に表示している。アラスカ全体のフラックスは 77.4 Gg CH<sub>4</sub> yr<sup>-1</sup> となり、その内ツンドラ地帯は 9.0 Gg CH<sub>4</sub> yr<sup>-1</sup> であった。アラスカ全土の平均マスフラックス密度(m<sup>2</sup> 当り)は約 1.57 g CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup> であるが、山岳地帯を含むツンドラ地帯(北極圏)は約 0.61 g CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup> であった。このレベルはスウェーデン(Bastiviken et al., 2004)、フィンランド(Juutinen et al., 2009)など北欧の永久凍土が存在しない地域と同等(0.78~0.92 g CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>)であり、やはりアラスカ北極圏において永久凍土融解がメタンフラックスに及ぼす強調効果は認められなかった。

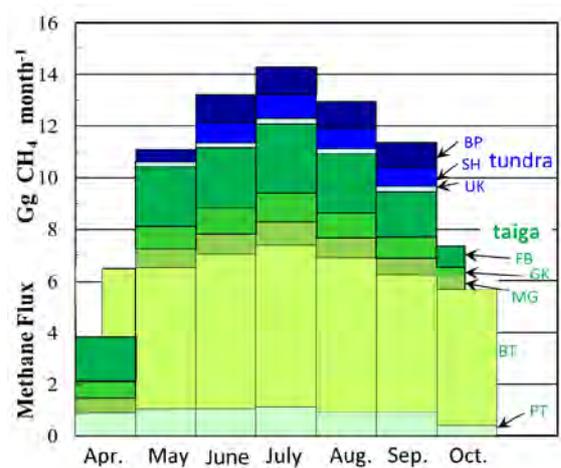


Fig. 3 Seasonal change in methane flux

### 4. 考察

多くの観測湖沼(特にツンドラ地帯)において、連続的に存在する永久凍土の融解に起因すると思われる  $DM$  の強調効果は認められなかった。永久凍土上の単一円形湖沼モデル周囲の 2 次元軸対称熱伝導解析を実施したところ、湖周囲のツンドラ植生部はもちろん、湖沼下の talik でも永久凍土の融解速度は極めて小さく、当然湖沼水中  $DM$  に影響しなかったことが示唆された。むしろタイガ地帯の湖沼でツンドラ地帯よりも有意に高い  $DM$  が認められ、今後これらの湖沼と永久凍土の状況、比較的若い thermokarst lakes に注目して観測する必要がある。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費(#24656132.)の一環として実施したものである。

### References

- Bastiviken, D., J. Cole, M. Pace and L. Tranvik (2004), Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate, *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 18, GB4009, doi:10.1029/2004GB002238.
- Cole J. J. and N. F. Caraco (1998), Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured 10 by the addition of SF<sub>6</sub>, *Limnology and Oceanography*, 43(4), 647-656.
- Juutinen, S., Rantakari, M., Kortelainen, P., Huttunen, J. T., Larmala, T., Alm, J., Silvola, J. and Martikainen, P. J. (2009), Methane dynamics in different boreal lake types, *Biogeosciences*, 6, 209-223.
- Sasaki, M., N. Endoh, S. Imura, S. Kudoh, T. Yamanouchi, S. Morimoto and G. Hashida (2010), Air-lake exchange of methane during the open water season in Syowa Oasis, East Antarctica., *J. Geophys. Res.*, 115, D16313, doi:10.1029/2010JD013822.
- Sasaki, M and Noboru Endoh (2014). Exchanges of Methane between Lakes and the Atmosphere in Hokkaido, Subarctic Climate Region, Japan. *J. of Water Resources and Ocean Science.*, 3(6), 89-94. doi: 10.11648/j.wros.20140306.14.