

洞爺湖における水環境変化と温室効果気体の挙動

齊藤 志保美^{1,2)}・吉田 磨^{1,2,3)}・白幡 和也²⁾
中谷 暢丈^{2,4,5)}・室田 欣弘⁶⁾

Water environmental change and distribution of greenhouse gases in Lake Toya

Shihomi SAITO^{1,2)}, Osamu YOSHIDA^{1,2,3)}, Kazuya SHIRAHATA²⁾,
Nobutake NAKATANI^{2,4,5)} and Yoshihiro MUROTA⁶⁾
(Accepted 16 January 2013)

1. はじめに

1.1. 温室効果気体

地球温暖化の原因となる温室効果気体は二酸化炭素 (CO₂), メタン (CH₄), 一酸化二窒素 (N₂O) 等があり, その排出量は 1870 年代の工業化以降増加しており, 主に人為起源の温室効果気体が地球を温暖化させている可能性が非常に高い [IPCC, 2007]。CH₄ は, 1 kg あたりでは CO₂ の約 25 倍の温室効果能があり, CO₂ に次いで大気中温室効果に寄与している。CH₄ は湖沼や河川などの水環境からも発生しており, 湖の大気中への CH₄ の自然放出総量は 6–16% とされているが, その見積り幅には誤差がみられ, 不確実性が高い [Bastviken et al., 2004]。一方 N₂O の温室効果能は CO₂ の約 298 倍であり, 主に窒素肥料の使用や硝化・脱窒過程で生成され, 人為的発生源のおよそ 30% 以上が河川から放出されている [西村, 2005]。湖沼において N₂O は好気的な表層水や深層水, 間隙水中で生成され, やがて大気へ放出される [Mengis et al., 1997]。

1.2. 湖沼の特徴

湖は汽水湖や淡水湖, 富栄養湖や貧栄養湖など環境の多様性が豊富である。我が国における湖沼環境は一般的に流入と流出の影響を受けやすく, 流入水は集水域への降雨や湧水に依存し, 水量や水質は集水域においての土地利用や地質, 植生, 腐植堆積物, 人為的な汚濁負荷等の影響を強く受ける。河川などから流入した栄養塩類の多くは, 長期にわたる湖沼内の生産活動等によって蓄積され, 底質を介し水中に回帰する。そのため多少の栄養塩流入はあるものの, 流入負荷より湖沼内循環の割合が多くなる。また, 湖沼は湛水体積が大きいことも特徴であり, 水の平均滞留時間が長い [社団法人 日本水環境学会 水環境ハンドブック, 2006]。

自然湖沼の 4 分の 1 は貧栄養湖である。貧栄養湖は水深 30 m 以上の湖に多く, 溶存栄養塩の中でも窒素, リンが乏しく, 沿岸帯の大型植物群落や植物プランクトン群集の現存量と生産量は共に小さい。透明度は 5–10 m 程度となり, 湖水の吸光係数は小さい。また溶存酸素消費量も小さく夏季においても溶存酸素濃度が減少することは少ない [吉田ら, 2009]。

¹⁾ 酪農学園大学環境システム学部生命環境学科環境地球化学研究室
Laboratory of Environmental Geochemistry, Department of Biosphere & Environmental Sciences, Faculty of Environment Systems, Rakuno Gakuen University, Ebetsu, Hokkaido 069-8501, Japan

²⁾ 酪農学園大学大学院酪農学研究科酪農学専攻修士課程
Graduate school of Dairy Science, Rakuno Gakuen University, Ebetsu, Hokkaido 069-8501, Japan

³⁾ 酪農学園大学農食環境学群環境共生学類環境地球化学研究室
Laboratory of Environmental Geochemistry, Department of Environmental & Symbiotic Science, College of Agriculture, Food and Environment Sciences, Rakuno Gakuen University, Ebetsu, Hokkaido 069-8501, Japan

⁴⁾ 酪農学園大学農食環境学群環境共生学類水質化学研究室
Laboratory of Water Chemistry, Department of Environmental and Symbiotic Science, College of Agriculture, Food and Environment Sciences, Rakuno Gakuen University, Ebetsu, Hokkaido 069-8501, Japan

⁵⁾ 酪農学園大学環境システム学部生命環境学科水質化学研究室
Laboratory of Water Chemistry, Department of Biosphere & Environmental Sciences, Faculty of Environment Systems, Rakuno Gakuen University, Ebetsu, Hokkaido 069-8501, Japan

⁶⁾ UW クリーンレイク洞爺湖
UW Clean Lake Toyako, 144, Toyako Onsen, Toyako-Town, Abuta-gun, Hokkaido 049-5721, Japan

湖の堆積物は重要な CH_4 の供給源であり [Bastviken et al., 2004; Crill et al., 1991; Walter et al., 2006], 湖内の攪拌等の物理的な要因は CH_4 の循環と放出を考察する上で重要であると示唆され, 貧栄養湖のような CH_4 濃度の低い環境においても同様なことがいえる [Bastviken et al., 2008]。堆積物からの放出量は, 微生物等による生成と酸化によって調整される [Bartlett and Harriss, 1993; King, 1992; Reeburgh, 2007]。湖は大気中 CH_4 の重要な供給源であるが, CH_4 放出量とその動態に関連した重要性は明らかではない。また, 滞留時間の短い CH_4 と大気への CH_4 放出の動態は CH_4 濃度の低い湖にも焦点を置かなければならないと示唆された [Bastviken et al., 2008]。

また N_2O は硝化・脱窒過程に生成されるため, 好気的環境や嫌気的環境と好気的環境の境界付近で発生するということが報告されている [Mengis et al., 1997]。 CH_4 濃度と N_2O 濃度は水温が高く, 栄養塩を多く含む水中において放出量が高く, 北方の湖においても CH_4 , N_2O が過飽和状態であり大気への供給源になっていると示唆された [Huttunen et al., 2003]。 N_2O は大気へ放出されると, 成層圏に到達し光化学反応により NO に変化し, オゾン層の破壊にも影響を与えるとされている [Crutzen et al., 1970]。

1.3. 洞爺湖の特徴

洞爺湖は支笏洞爺国立公園内に位置する湖で約 11 万年前の巨大な噴火によってつくられたカルデラ湖である。面積 70.7 km^2 , 東西直径約 11 km , 南北直径約 8 km , 平均水深 117.0 m , 最大水深 179.7 m の日本で 9 番目の面積を持った準閉鎖系淡水湖であり, 貧栄養湖である [洞爺湖町 Web-Site; <http://g8-summit.town.toyako.hokkaido.jp/> 2012/12/27]。夏季には水温躍層が形成され, 表層水と深層水が混合されなくなる。秋には表層水温が低くなることで水温躍層が厚くなり, やがて全層が混合される [吉田ら, 2009]。洞爺湖への流入河川は大小様々あるが, 流出河川は壮瞥川の 1 本しかない。南岸には温泉街があり, 排水に由来する栄養塩供給が懸念されている [安藤ら, 2011]。

洞爺湖の中央に位置する中島において 1957-1966 年にエゾシカ (*Cervus nippon yesoensis*) が人為的に持ち込まれ, その後は野生化し, 現在では数百頭が生息している。中島は湖面から吹き上げる寒風の影響により南東と北西で気温や積雪量に違いがある。中島の南東は気温が高く積雪量も少ないため,

エゾシカの多くが南東に生息している。1980 年代からエゾシカにより森林構造に影響が出始め, 中島の植生は大きく変化した [梶ら, 1998]。落合 [2009] によると, 中島内の土壌の硝化率が高く, 土壌が窒素不飽和状態である可能性が示唆された。これらのことから, 土壌に含まれた温室効果物質が降雨や雪解け等により洞爺湖に流出している可能性は高い。

近年, 洞爺湖において外来生物であるウチダザリガニ (*Pacifastacus leniunculus*) の分布が洞爺湖南岸において急速に拡大している [安藤ら, 2011]。ウチダザリガニは繁殖能力が強く, 魚類, 底生生物, 水草などの捕食による湖底環境の変化が懸念される。また, 湖底の堆積物は CH_4 生成の Hot spot であるため [Huttunen et al., 2006], ウチダザリガニの活動により湖底に堆積した有機物が攪拌され, 水柱に拡散することで CH_4 放出が促進される可能性がある [安藤ら, 2011]。

本研究では, 洞爺湖内の水環境が異なる観測点における温室効果気体の挙動について考察を行った。本論文では 2011 年における観測データを速報として報告する。

2. 方 法

2.1. 観測地及び採水方法

観測は 2011 年 4 月から 12 月までの計 9 回行った。

表層水の採水にはプラスチック製のバケツを使用し, 深層水の採水にはニスキン採水器を使用した。

2.2. 観測地点

温泉街 (H ライン), 中島周辺, 河川流入口・流出口と新山沼の 6 ヶ所で観測を行った。温泉街は 4 ヶ所 (P01, P20, P23, L01) で採水を行った。花火ラインは H01-H05 の 5 ヶ所で温泉街と中島の中間で行った (図 1)。中島周辺は 3 ヶ所 (N01, N02, B01) で採水を行った。河川流入口は LA06, LA07 の 2 ヶ所, 河川流出口は LA01, LA02 の 2 ヶ所で行った。表 1 に採水層を示す。

河川流入口ではソウベツ川周辺で行われている農業排水の影響を受けていると考えられる水環境であり, 河川流出口及び中島周辺は周りに自然が多く, 自然起源の温室効果物質の供給が考えられる。温泉街では温泉排水とウチダザリガニの増加に伴う影響が考えられる。

2.3. 観測項目

メタン濃度 (CH_4), 一酸化二窒素濃度 (N_2O), 栄

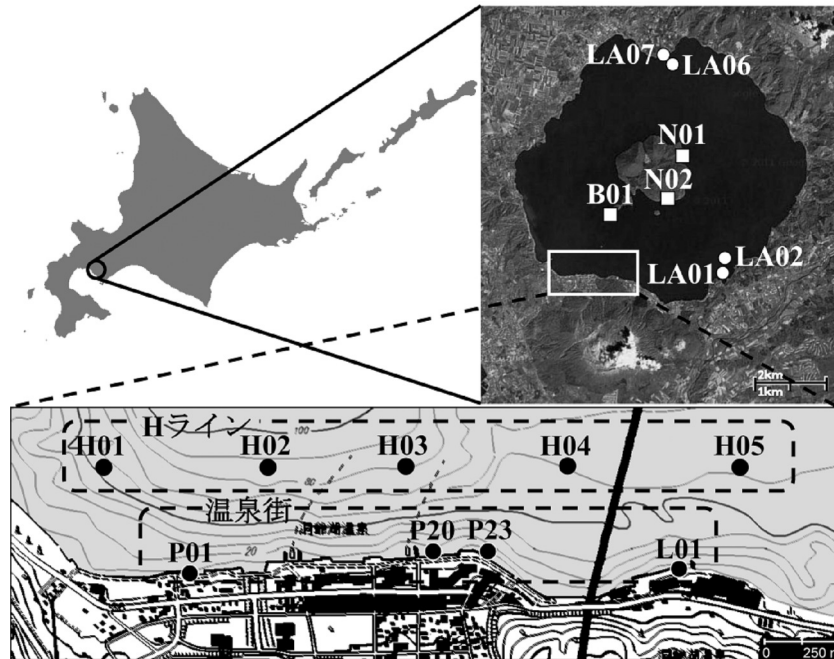


図1 本研究における観測点

表1 各測点の採水層

測点	Depth (m)			
H01	0	10	30	b-1 (65)
H02	0	10	30	50 b-1 (85)
H03	0	10	30	50 b-1 (80)
H04	0	10	30	b-1 (60)
H05	0	10	30	b-1 (61)
N01	0	5	b-1 (10)	
N02	0	5	b-1 (10)	
B01	0	5	b-1 (10)	
LA01	0	10	30	b-1 (50)
LA02	0	10	30	50 b-1 (100)
LA06	0	10	30	50 b-1 (100)
LA07	0	10	30	b-1 (50)
P01	0	b-1 (5)		
P20	0	b-1 (7)		
P23	0	b-1 (7)		
L01	0	b-1 (5)		

b-1: bottom - 1 (m)

養塩類(硝酸塩, ケイ酸塩), 水温, 溶存酸素(DO), 風速, 気温, 透明度を観測した。

2.4. 分析方法

2.4.1. CH₄ 濃度

CH₄ 濃度は吉田ら [2011] に基づいて分析を行った。

2.4.2. N₂O 濃度

N₂O 濃度は吉田ら [2011] に基づいて分析を行っ

た。

2.4.3. 栄養塩類

水試料は 50 mL ポリボトルで 2 回共洗いの後に採取し, 陸上で 0.45 μm のフィルターにかけた後, 50 mL ポリボトルに移し冷凍庫で保存した。

硝酸塩 (NO₃⁻), ケイ酸塩 (SiO₂⁻) 濃度は吉田ら [2011] に基づいて分析を行った。

2.4.4. 溶存酸素 (Dissolved Oxygen: DO)

DO は, ポータブル溶存酸素計 (F-102-5, 飯島電子工業株式会社製) を用いて測定した。大気交換によって DO 濃度が変化しないよう, 採水後ただちに採水器から分取した。

2.4.5. 透明度

透明度は直径 30 cm の白い平らな木製の円盤 (透明度板) に重りをつけ, 鉛直に水中に下ろしていき, 真上から目視できる限界の深さをメートル単位で測定した [気象庁, 1999]。

2.4.6. 気温・風速

気温と風速はデジタル風速計 (CUSTOM WS-01) を用いた。

3. 結果・考察

3.1. Hライン

2011年5–10月までの観測における水温、DO、 CH_4 、 N_2O の結果を図2–5に示す。

5月では湖内の水温は全層で一様に低く、表層の一部で水温躍層ができ始めていた。気温が高くなり水温躍層ができると物質の上下移動が起りにくくなり、躍層下で CH_4 濃度が高くなった。7–8月には水温がばらつき、深層においても高くなった。9–10月になると水温躍層が厚くなり、濃度は著しく低くなった。気温が低くなると冷やされた表層水が沈み込み、やがて全層が混合される。そのため、水温躍層下の CH_4 は表層水と深層水が混合される際に、大気へ放出している可能性が高い。

DOは5–6月では全層で一様であり、7–10月にはH02、H03の底層で低い値を示した。水温や CH_4 濃度の結果からもH02、H03の底層において変化がみられた。

N_2O は硝化・脱窒過程に生成されるため、好気的環境や嫌気的環境と好気的環境の境界付近で発生するということが報告されている[Mengis *et al.*, 1997]。そのため N_2O 濃度は表層で低くなるが水温躍層による影響は少なく、DOの濃度変化が激しい場所で高くなる傾向があった。

CH_4 は嫌気的環境下で生成されることが知られているが、本研究において貧酸素状態はみられなかったため、 CH_4 は水柱ではなく堆積物中で生成されていると考えられる。また水温躍層付近における濃度変化が大きいと、縦方向へ濃度変化していると考えられる。

N_2O は表層において濃度が低くなるが、水温躍層による影響を受けず大気へ放出されている可能性が高いと考えられる。さらに、洞爺湖内はDO濃度が豊富なため、 N_2O は主に硝化過程で生成されている可能性が高い。

3.2. 温泉街・中島周辺・河川流入口・流出口

2011年5–10月までの結果を表2–6に示す。また、図6–9に温泉街(P01, P20, P23, L01)・中島周辺(N01, N02, B01)・河川流入口(LA01, LA02)・流出口(LA06, LA07)の結果を平均値で示した。

温泉街は水深が10 mに満たないため、表層と深層の水温に差がほぼみられなかった。温泉街では温泉排水の影響で水温が高くなると予測していたが、他の観測点の表層付近と比べてもほとんど差がなかった。中島周辺においてN01, N02ではb-1 mの水温が7月に一度下がったが、B01では高くなった。

温泉街の CH_4 濃度は洞爺湖内で最も低濃度であった。中島周辺における CH_4 濃度はB01で低く、

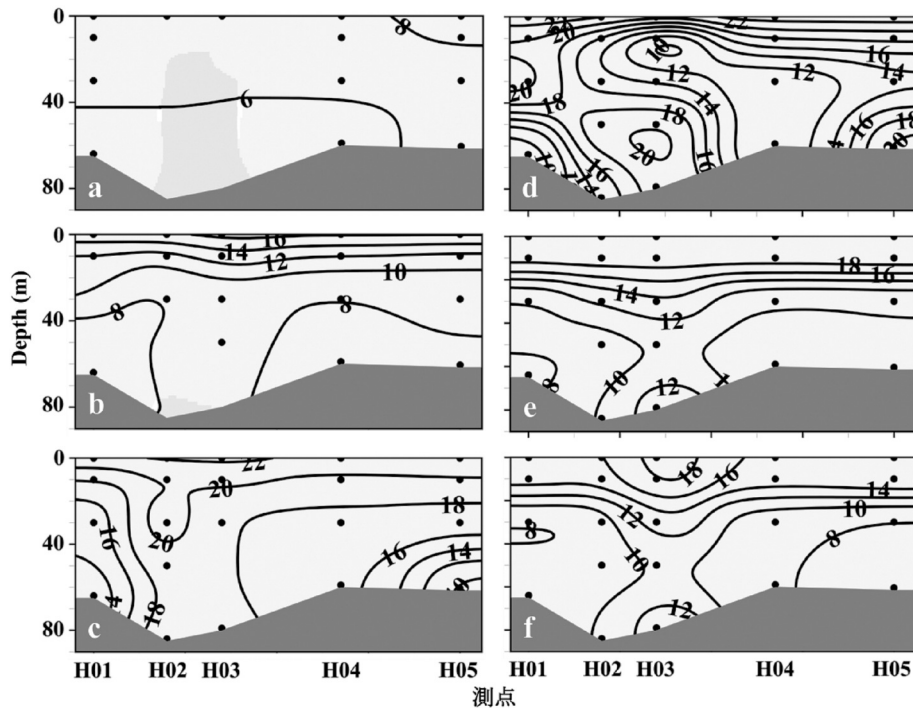


図2 Hラインにおける(a)5月、(b)6月、(c)7月、(d)8月、(e)9月、(f)10月の水温(°C)の鉛直断面分布図

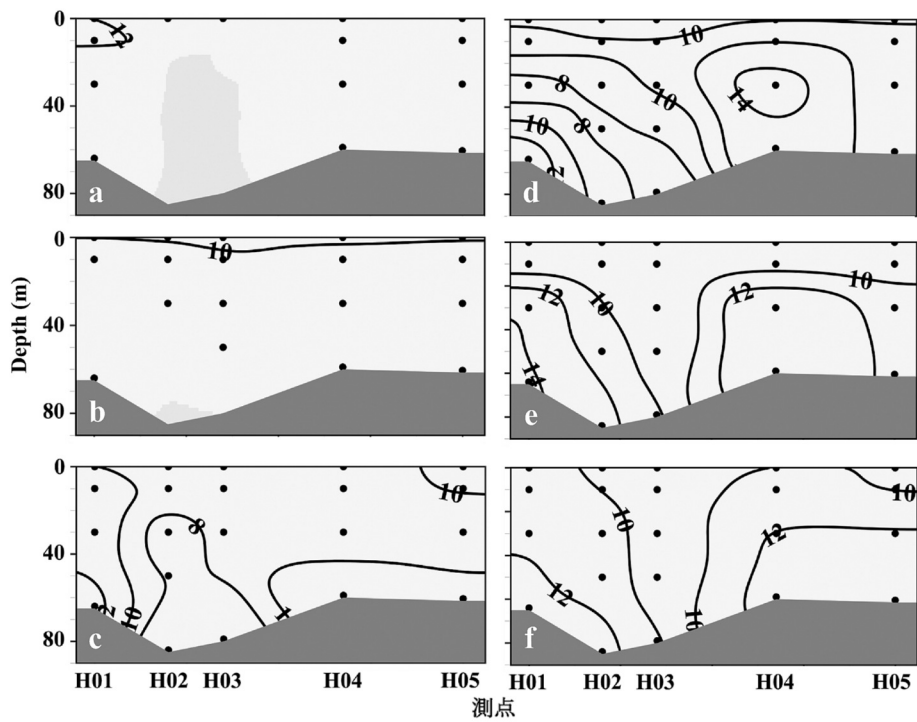


図3 Hラインにおける(a)5月, (b)6月, (c)7月, (d)8月, (e)9月, (f)10月のDO (mg L^{-1})の鉛直断面分布図

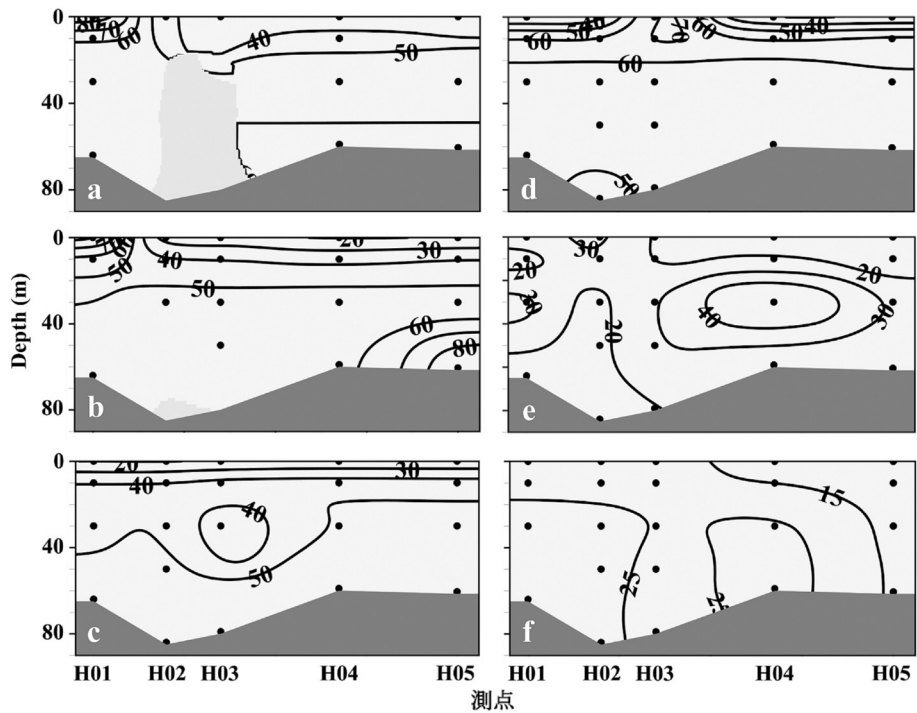


図4 Hラインにおける(a)5月, (b)6月, (c)7月, (d)8月, (e)9月, (f)10月の CH_4 濃度 (nmol kg^{-1})の鉛直断面分布図

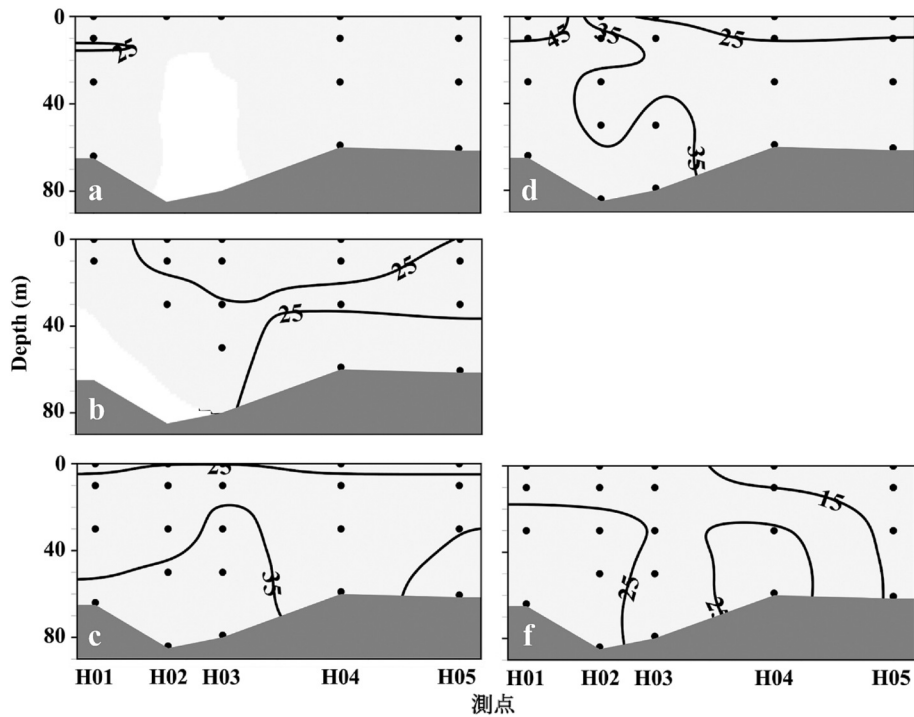


図5 Hラインにおける(a)5月, (b)6月, (c)7月, (d)8月, (e)9月, (f)10月のN₂O濃度 (nmol kg⁻¹) の鉛直断面分布図

表2 中島周辺, 河川流入・流出口, 温泉街における2010年の月ごとの水温(°C)

測点	Depth	5月	6月	7月	8月	9月	10月
N01	0	13.3	18.6	23.4	24.8	20.3	16.6
	5	8.4	18.3	20.9	24.4	20.1	16.6
	b-1	6.7	15.4	11.7	14.6	19.9	16.7
N02	0	10.2	18.9	23.0	24.8	20.6	16.1
	5	9.0	17.0	19.7	24.1	20.7	16.2
	b-1	8.4	13.4	13.0	18.2	20.1	16.4
B01	0	9.5	18.0	22.6	24.7	20.3	16.0
	5	9.2	16.5	21.6	23.5	21.4	16.0
	b-1	8.8	7.7	16.7	13.2	13.1	16.0
LA01	0	11.2	19.2	23.4	25.0	20.2	16.5
	10	12.1	10.4	12.6	17.4	18.1	10.4
	30	12.0	11.7	8.3	11.5	8.6	8.3
	b-1	11.3	10.3	7.3	10.6	7.7	7.8
LA02	0	—	18.7	23.4	25.1	20.3	10.4
	10	—	8.1	13.5	18.2	19.7	16.7
	30	—	7.8	9.7	9.4	8.3	9.2
	50	—	—	8.1	15.4	8.4	7.3
	b-1	—	9.7	7.5	9.0	8.5	9.2
LA06	0	11.4	19.4	9.3	24.5	20.1	16.4
	10	11.2	14.3	14.6	20.8	19.7	16.5
	30	11.6	9.2	13.1	9.7	12.9	9.5
	50	11.7	—	10.3	12.3	8.5	9.7
	b-1	11.2	7.6	8.5	17.9	8.5	7.8
LA07	0	11.8	19.4	10.1	24.5	20.0	16.3
	10	11.9	12.7	14.4	24.2	19.5	15.5
	30	—	8.8	15.8	13.7	10.3	8.7
	b-1	11.3	9.1	9.5	14.3	12.6	7.5
P01	0	8.6	16.9	22.9	23.6	19.4	15.5

表 2 (続き)

測点	Depth	5月	6月	7月	8月	9月	10月
P20	b-1	8.3	16.2	22.9	23.6	19.5	11.4
	0	9.5	18.1	22.8	22.6	19.5	15.5
P 23	b-1	9.0	15.8	22.1	22.6	19.5	15.5
	0	9.3	18.1	22.7	22.2	24.9	15.5
L 01	b-1	8.9	15.9	21.3	22.6	24.1	15.5
	0	9.4	18.1	22.5	23.8	24.9	15.4
	b-1	9.3	17.5	22.2	23.8	24.9	15.4

- : データ欠損

表 3 中島周辺, 河川流入・流出口, 温泉街における 2010 年の月ごとの DO (mg L⁻¹)

測点	Depth	5月	6月	7月	8月	9月	10月
N01	0	10.5	6.9	8.4	9.0	8.8	10.0
	5	11.3	6.9	10.1	9.2	8.3	9.9
	b-1	12.1	7.0	13.8	13.0	8.9	9.6
N02	0	11.3	7.3	8.3	9.3	8.4	9.6
	5	11.5	7.2	10.4	9.5	8.8	10.0
	b-1	12.0	7.2	14.0	12.4	8.6	10.0
B01	0	11.5	7.0	8.4	8.1	8.7	9.2
	5	11.7	7.2	7.9	8.3	8.2	10.2
	b-1	11.8	7.2	11.8	12.0	13.2	10.3
LA01	0	11.2	8.6	7.9	7.6	8.4	9.6
	10	11.6	10.9	13.1	10.1	8.9	10.1
	30	-	11.0	13.7	12.2	12.8	12.1
LA02	b-1	11.7	10.6	13.0	11.8	11.9	12.2
	0	11.5	8.8	8.2	8.1	8.8	10.1
	10	12.2	11.2	13.0	10.3	8.4	10.1
LA06	30	-	11.1	12.9	12.1	14.3	11.8
	50	-	-	12.9	10.1	12.5	11.5
	b-1	-	10.9	12.8	11.3	12.1	12.1
LA07	0	11.2	8.6	-	9.1	7.9	9.9
	10	12.1	11.0	11.4	10.5	8.9	9.7
	30	12.0	10.2	12.7	12.9	13.7	11.8
P01	50	11.3	-	13.5	12.9	14.1	12.0
	b-1	11.4	10.7	14.0	12.8	14.7	12.1
	0	11.2	8.9	-	9.1	8.3	9.9
P20	10	11.8	10.8	13.1	13.8	8.9	9.9
	30	11.9	11.4	12.5	13.1	12.2	12.5
	b-1	11.3	10.8	13.9	13.3	12.6	12.0
P23	0	11.8	10.5	8.3	7.9	8.7	8.9
	b-1	11.9	11.2	8.3	7.9	8.1	15.5
	0	11.6	10.1	8.2	7.8	8.1	8.9
L01	b-1	11.6	11.3	8.4	7.8	8.1	8.9
	0	11.8	10.2	18.3	7.8	7.8	8.9
	b-1	11.8	11.0	8.6	7.9	7.9	8.9
L01	0	11.5	10.1	8.5	7.9	7.9	9.5
	b-1	11.5	11.2	9.1	8.4	8.4	9.7

- : データ欠損

表 4 中島周辺, 河川流入・流出口, 温泉街における 2010 年の月ごとの CH₄ 濃度 (nmol kg⁻¹)

測点	Depth	5月	6月	7月	8月	9月	10月
N01	0	24.79	8.20	9.79	16.67	95.69	14.48
	5	36.84	12.10	29.04	19.51	16.28	15.85

表 4 (続き)

測点	Depth	5月	6月	7月	8月	9月	10月
N02	b-1	52.80	96.36	59.26	68.13	49.85	19.75
	0	31.00	23.14	13.43	17.92	13.52	15.97
	5	52.54	24.35	48.95	72.06	7.71	15.11
B01	b-1	36.44	28.25	51.74	76.13	30.04	15.63
	0	30.98	183.12	12.79	16.10	10.69	15.23
	5	34.27	35.08	30.86	23.20	16.21	16.90
LA01	b-1	56.94	55.63	44.79	55.07	39.67	17.61
	0	24.33	15.00	9.87	98.64	16.97	17.66
	10	44.04	44.19	61.23	88.83	12.95	—
LA02	30	50.50	47.70	50.87	55.46	39.17	16.87
	b-1	50.87	48.90	54.06	54.36	22.62	23.91
	0	24.43	10.37	12.92	18.61	18.50	21.57
LA06	10	38.47	42.60	69.40	91.12	28.77	18.59
	30	49.14	46.60	50.41	59.77	39.35	35.24
	50	51.18	53.46	56.80	55.82	29.87	17.18
LA07	b-1	55.96	160.14	137.66	53.87	28.92	53.22
	0	23.79	11.41	8.89	14.62	14.68	15.13
	10	40.23	40.25	82.51	185.69	38.00	18.63
P01	30	60.58	69.01	57.57	79.57	64.73	43.95
	50	78.86	—	118.54	69.75	52.99	10.30
	b-1	76.30	208.23	108.11	236.23	21.51	7.33
P20	0	28.45	23.34	9.28	16.87	15.00	13.82
	10	45.00	51.25	65.44	185.80	34.31	19.03
	30	—	64.27	56.21	213.88	76.20	116.03
P23	b-1	92.89	120.33	121.07	281.41	78.19	35.58
	0	37.72	19.69	12.60	19.97	13.67	15.73
	b-1	34.99	21.65	12.22	18.77	13.40	14.92
L01	0	65.29	18.36	11.83	24.99	17.55	17.74
	b-1	29.39	36.24	11.63	24.68	15.59	21.51
	0	222.89	20.65	11.10	20.36	14.62	17.51
L01	b-1	38.17	31.45	26.54	21.75	15.37	17.36
	0	26.40	27.07	13.02	20.72	14.15	15.03
	b-1	29.62	26.99	15.25	22.37	14.79	15.10

—: データ欠損

表 5 中島周辺, 河川流入・流出口, 温泉街における 2010 年の月ごとの N₂O 濃度 (nmol kg⁻¹)

測点	Depth	5月	6月	7月	8月	9月	10月
N01	0	24.20	16.23	11.56	22.47	—	13.29
	5	24.16	16.58	13.23	19.79	—	19.84
	b-1	23.37	19.87	19.39	34.55	—	18.11
N02	0	20.04	15.44	11.55	17.89	—	18.65
	5	21.50	16.70	14.00	12.96	—	18.83
	b-1	29.61	19.49	19.46	20.43	—	19.32
B01	0	19.65	15.41	11.65	20.25	—	20.19
	5	20.19	17.97	12.77	19.80	—	20.42
	b-1	20.81	22.82	15.73	31.81	—	20.58
LA01	0	17.46	17.82	11.82	13.48	—	20.91
	10	18.04	23.62	18.09	21.91	—	21.44
	30	20.10	23.14	19.89	21.66	—	32.95
LA02	b-1	19.33	23.98	20.58	19.21	—	35.43
	0	19.18	16.39	10.72	8.53	—	23.39
	10	17.48	23.88	16.97	15.91	—	24.91
LA02	30	19.10	25.24	18.76	19.23	—	36.43

表 5 (続き)

測点	Depth	5月	6月	7月	8月	9月	10月
LA06	50	19.89	25.48	19.12	19.70	—	36.35
	b-1	18.65	26.19	18.59	18.43	—	36.38
	0	18.21	17.92	10.52	9.50	—	23.65
	10	18.54	25.18	16.17	14.60	—	24.25
	30	19.57	26.34	17.97	19.27	—	35.59
LA07	50	18.58	—	18.15	18.57	—	35.53
	b-1	20.37	27.38	18.00	19.26	—	36.19
	0	18.41	19.72	14.93	9.45	—	24.34
	10	18.37	24.77	16.01	18.27	—	24.76
P01	30	—	26.74	19.50	18.64	—	36.34
	b-1	18.92	26.65	18.93	19.97	—	36.93
P20	0	14.98	20.84	10.42	19.04	—	21.64
	b-1	14.75	20.79	10.32	19.17	—	21.75
P23	0	—	19.04	10.35	9.50	—	22.28
	b-1	20.82	19.65	10.77	9.58	—	20.43
L01	0	24.03	18.44	11.55	19.57	—	21.73
	b-1	19.85	20.95	12.50	20.01	—	23.40
	0	19.29	23.96	12.03	18.68	—	21.65
	b-1	19.40	23.55	12.55	18.60	—	20.86

— : データ欠損

9月のN₂O濃度は未調査。表 6 中島周辺, 河川流入・流出口, 温泉街における2010年の月ごとのNO₃濃度 (μM)

測点	Depth	5月	6月	7月	8月	9月	10月
N01	0	17.92	16.70	19.63	12.35	15.56	14.35
	5	17.63	16.70	18.49	12.78	13.99	14.49
	b-1	17.34	15.99	18.20	13.06	14.42	14.49
N02	0	—	15.99	17.92	11.21	14.13	14.49
	5	17.20	16.56	18.34	10.49	13.28	15.06
	b-1	17.49	15.13	17.92	11.78	13.99	14.78
B01	0	17.34	15.85	17.77	13.06	14.42	14.49
	5	17.34	15.56	18.20	14.78	14.56	14.49
	b-1	16.92	16.13	18.49	10.92	13.99	14.35
LA01	0	17.49	16.70	18.34	12.21	14.13	14.49
	10	17.20	16.27	18.49	14.78	14.56	14.35
	30	17.06	15.27	17.77	16.92	14.42	16.92
	b-1	17.20	16.42	18.92	17.34	15.85	17.49
LA02	0	16.92	16.70	19.49	15.35	—	14.49
	10	17.34	16.27	18.49	14.49	—	14.35
	30	15.63	15.42	17.77	16.77	—	17.06
	50	17.20	16.56	18.92	17.34	—	17.77
	b-1	17.06	16.85	19.34	17.77	—	18.06
LA06	0	16.63	17.27	19.34	14.92	16.70	14.49
	10	16.77	16.56	18.49	14.92	—	14.49
	30	16.92	15.99	17.77	15.49	—	17.06
	50	16.49	—	18.92	17.49	—	17.49
LA07	b-1	18.06	16.27	19.20	16.20	—	18.49
	0	16.49	16.85	19.49	15.06	15.70	14.63
	10	16.77	16.99	18.34	15.20	14.42	14.92
	30	—	15.99	17.92	16.77	14.28	19.06
P01	b-1	16.49	16.70	19.34	16.35	16.13	17.49
	0	17.20	—	22.48	15.20	16.42	14.49
P20	b-1	16.35	15.99	18.34	15.06	14.70	14.49
	0	17.63	15.99	19.06	14.92	14.56	14.35

表 6 (続き)

測点	Depth	5月	6月	7月	8月	9月	10月
P23	b-1	16.77	16.56	19.20	16.35	14.70	14.49
	0	17.20	16.13	18.49	15.92	15.13	14.49
L01	b-1	17.20	16.42	18.34	15.35	14.70	14.49
	0	16.20	14.70	18.34	15.20	14.56	14.06
	b-1	16.20	16.13	18.20	14.92	14.56	14.06

—: データ欠損
9月のLA02, LA06のNO₃濃度は未調査。

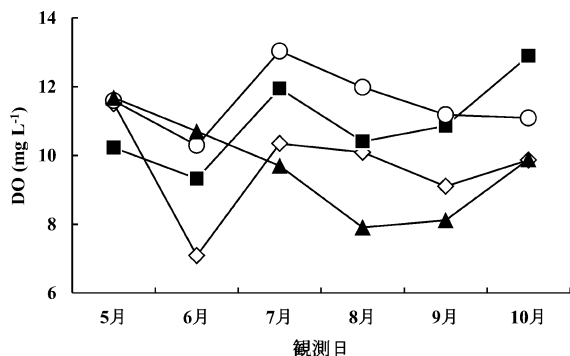


図 6 中島周辺(◇), 河川流入口(○), 河川流出口(■), 温泉街(▲)における DO 濃度の月平均

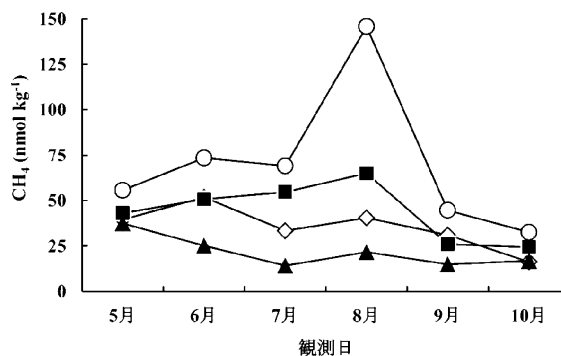


図 7 中島周辺(◇), 河川流入口(○), 河川流出口(■), 温泉街(▲)における CH₄ 濃度の月平均

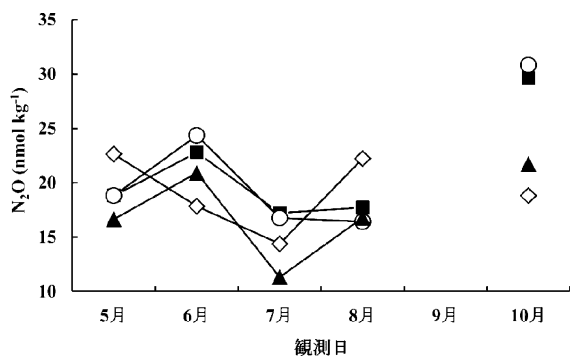


図 8 中島周辺(◇), 河川流入口(○), 河川流出口(■), 温泉街(▲)における N₂O 濃度の月平均

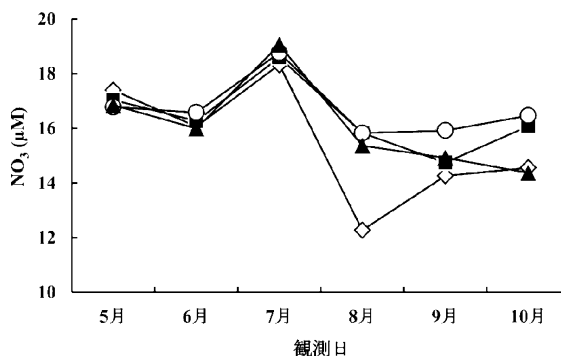


図 9 中島周辺(◇), 河川流入口(○), 河川流出口(■), 温泉街(▲)における NO₃ 濃度の月平均

N01, N02 で高くなった。湖底環境で比較すると, B01 が岩であるのに対し N01, N02 は落葉が多く, その落葉が分解される過程で CH₄ が生成されていると考えられる。また, 中島周辺は水深が浅いため, 湖底で生成された CH₄ は水柱で酸化されずそのまま大気へ放出されている可能性が高い。河川流入口の b-1 m の CH₄ 濃度は本研究における観測点の中で最も高濃度であった。表層では他の観測点と同様に低濃度であるため, 河川により供給された有機物質が湖底に堆積し, その堆積物中で生成されていると考えられる。

N₂O 濃度は中島周辺を除く観測点において 5-

8月の間に増加と減少を繰り返した。7月の最も低濃度の時に NO₃ 濃度が増加する傾向がみられた。NO₃ は硝化反応の最終生成物であるため, 副生成物である N₂O は脱窒反応が起こらない限り増加しないと考えられる。一般的に N₂O と NO₃ は相関があることが知られているが, 本研究において洞爺湖内全体的に NO₃ 濃度の値はほとんど変わらなかったため相関関係がみられなかった。

図 10, 11 に CH₄ 及び N₂O 濃度とフラックスの年平均を示した。フラックスを計算する際にガス交換係数を求める。ガス交換係数は風速に依存するため, 風が弱いとフラックスは低くなる。本研究では風速

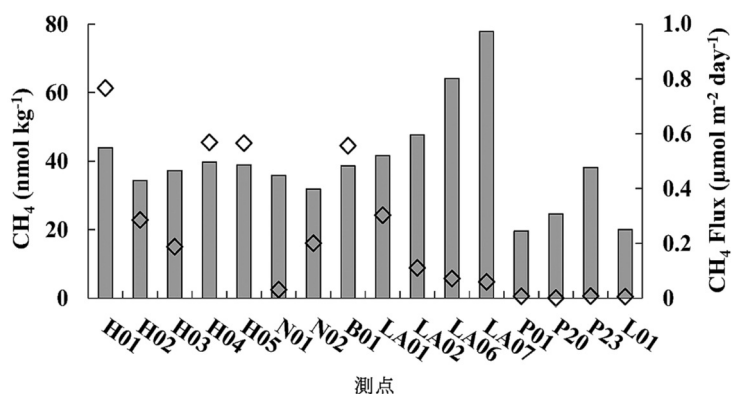


図 10 各測点における CH₄ 濃度 (■) と CH₄ フラックス (◇) の年平均

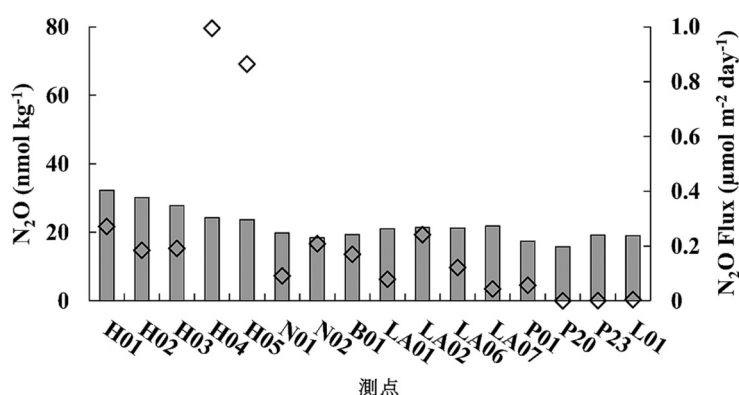


図 11 各測点における N₂O 濃度 (■) と N₂O フラックス (◇) の年平均

表 7 湖の特徴と CH₄ Flux と N₂O Flux

Lake	Year	Area (km ²)	Max. depth (m)	trophic state	CH ₄ Flux (μmol m ⁻² day ⁻¹)	N ₂ O Flux (μmol m ⁻² day ⁻¹)	Reference
Postilampi	1998	0.03	4	Eutrophic	4900	7.0	Huttunen et al., 2002
Vehmasjärvi	1998	0.41	19	Eutrophic	110	5.9	Huttunen et al., 2002
Mäkijärvi	1998	0.20	9	Oligotrophic	110	2.1	Huttunen et al., 2002
Uzlina	2006				9.5		Pavel et al., 2009
Isac	2006				6.3		Pavel et al., 2009
Rosulet	2006				12.1		Pavel et al., 2009
Ernest	1988			Oligotrophic		8.4	Seizinger, 1988
Lacawac	1988			Oligotrophic		1.0	Seizinger, 1988
Alpnachersee	1997	4.80	35	Mesotrophic		2.2	Mengis et al., 1997
Brienzersee	1997	29.80	261	Mesotrophic		20.2	Mengis et al., 1997
Lac de Neuchatel	1997	217.90	153	Mesotrophic		0.2	Mengis et al., 1997
Walensee	1997	24.10	145	Mesotrophic		7.4	Mengis et al., 1997
Toya	2010	70.70	180	Oligotrophic	0.2	0.3	This study

計を用いて現地で約 20 秒間の最大瞬間風速の平均値を使用している。したがって、図 10 より LA06, 07 において CH₄ 濃度が最大であったが、フラックスは低いという結果が得られた。CH₄ および N₂O 濃度は夏季に高いが、秋季には減少していった。したがって、CH₄ 及び N₂O は夏季に水柱に蓄積し、冬

季に鉛直混合と強風により大気へ放出されている可能性が高い。CH₄ 濃度と比べて N₂O 濃度は低い結果となったが、N₂O は CH₄ の約 10 倍の温室効果をもたらすため地球温暖化をより促進させる温室効果気体として決して無視できない。しかし、他の研究による CH₄ 及び N₂O フラックス結果と比較して

も、洞爺湖では低い結果となった(表7)。また、ある程度面積が広く、最高深度が100 m以上の湖ではCH₄及びN₂Oフラックスが低い傾向がある。

4. ま と め

温室効果気体であるCH₄は湖底環境や堆積物の性質の違いにより、生成量が異なると考えられる。CH₄は底質が砂地や岩の場所では生成量は少なく、流入河川や落葉など有機物が堆積しやすい場所では生成量は高くなる。本研究においてCH₄濃度が最も低いのは温泉街だった。温泉街においてウチダザリガニの生息が確認されているP20, P23とそうではないP01, L01とでは大きな変化はみられなかったが、底生生物の捕食による湖底環境の変化が今後、洞爺湖において水環境の変化の要因となり得る。したがって、ウチダザリガニの分布及び温室効果気体等の継続的な観測が必要である。

N₂OはCH₄と異なり、堆積物中ではなく水柱で生成されていると考えられる。間隙水のような好気的環境と嫌気的環境の境目のような場所で硝化・脱窒することで生成される。また、近年中島においてエゾシカの過剰繁殖により、森林構造に影響し中島の植生は大きく変化している。森林生態系における窒素循環は、落葉等による植物体中の窒素の移動や微生物の働きによる土壌中での窒素の形態変化、植物による土壌中の吸収等の過程で成り立っている[小山, 2004]。エゾシカが増加し、摂食による植物の減少や排泄物が増えることで土壌中の窒素が増え、降雨や雪解け等により洞爺湖内に流出する可能性が示唆された。洞爺湖への流入河川であるソウベツ川に沿って農業が盛んであり、N₂Oは主に農業活動による影響が大きいとされているが、河川流入口においてN₂O, NO₃濃度は特別に高くはなかった。したがって、洞爺湖へ流入する前にN₂Oは大気へ放出され、NO₃は効率よく植物に吸収されていると考えられる。さらに、膨大な貯水量と水の滞留時間が長いことが洞爺湖の物質循環に大きな役割を果たしていると考えられる。

今後の課題として湖底堆積物のC/N比及び栄養塩等の分析を行うことで洞爺湖における温室効果気体の詳細な生成要因が明らかになるだろう。さらに、CH₄安定同位体($\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$)及びN₂O安定同位体($\delta^{15}\text{N}_{\text{N}_2\text{O}}$)の分析を行い生成された温室効果気体の起源が明らかにする必要がある。

5. 謝 辞

UW クリーンレイク洞爺湖山本勲様には観測の

際、観測や宿泊に関するあらゆる面でサポートして頂きました。心より感謝申し上げます。

洞爺マリンの毛利元期様には動力船を貸していただき観測の際、朝早くから船を出して頂きました。心より感謝申し上げます。

水質化学研究室の皆様には、観測を行うにあたりお力添えを頂きました。心より感謝申し上げます。

また、環境地球化学研究室のOB・OGをはじめ、先輩、同期、後輩の皆様には観測や分析の際、研究に有益な財産や、ご助言や手助けを頂きました。心より感謝申し上げます。

本稿の改訂に際し貴重なコメントを頂きました2人の校閲者に感謝いたします。

本研究の一部は「社団法人 洞爺湖温泉観光協会」の助成を受けて行ったものである。

6. 参 考 文 献

- 安藤達哉, 春口洋貴, 吉田 磨, 吉田剛司, 加藤康大, 室田弘欣(2011), 洞爺湖における温室効果気体の挙動と水環境及びウチダザリガニの分布, *J. Rakuno Gakuen Univ.*, 35, 69-78.
- Bartlett, K. B., Harriss R. C. (1993), Review and assessment of methane emissions from wetlands. *Chemosphere* 26, 261-320.
- Bastviken, D., J. Cole, M. Pace, and L. Yranvik. (2004), Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate, *Global Biogeochem. Cycles*, 18, 1-12.
- Bastviken, D., and J. J. Cole and M. L. Pace and M. C. Van de Bogert (2008), Fate of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and CH₄ emission. *J. Geophys. Res.*, 113, G02024, doi: 10.1029/2007JG000608.
- Crill, P. M., Harriss R. C., Bartlett K. B. (1991), Methane fluxes from terrestrial wetland environment. *American Soc. for Microbiology*, Washington, pp. 91-109.
- Crutzen, P. J. (1970), The influence of nitrous oxygen on the atmospheric ozone content. *J. royal meteor. soc.*, 96, 320-325.
- Huttunen, J. T., T. S. Väisänen, M. Heikkinen, S. Hellsten, H. Nykänen, O. Nenonen, P. J. Martikainen (2002), Exchange of CO₂, CH₄ and N₂O between the atmosphere and two northern boreal ponds with catchments

- dominated by peatlands or forests, *Plant and Soil*, 242, 137-146.
- Huttunen, J. T., A. Jukka, L. Anu, J. Sari, L. Tuula, H. Taina, S. Jouko, M. J. Petti (2003), Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous effects on the aquatic greenhouse gas emissions, *Chemosphere*, 52, 609-621.
- Huttunen, J. T., T. S. Vaisanen, S. K. Hellsten, P. J. Martikainen (2006), Methane fluxes at sediment-water interface in some boreal lakes and reservoirs, *Boreal Environ. Res.*, 11, 27-34.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007), Summary for Policymakers, *Climate Change 2007: The physical Sci. Basis*, edited by Solomon, S. et al., Cambridge Univ. Press, New York.
- 梶 光一, 松田裕之, 宇野裕之, 平川浩文, 玉田克巳, 齊藤 隆(1998), エゾシカ個体群の管理方法とその課題, *哺乳類科学*, 38(2), 301-313.
- 気象庁(1999), *海洋観測指針 第1部*, 気象業務支援センター.
- King, GM (1992), Ecological aspects of methane consumption, a key determinant of global methane dynamics. *Adv. Microb. Ecol.*, 12, 431-468.
- 小山里奈(2004), 樹木-土壌系の窒素循環 — 樹木による土壌中の窒素の吸収と同化 —, *地球環境*, 9(1), 11-18.
- Mengis, M., R., Gächter and B., Wehrli (1997), Sources and sinks of nitrous oxide (N₂O) in deep lakes. *Biogeochem.*, 38, 281-301.
- 西村 修(2005), 河川と栄養塩類 管理に向けての提言, 財団法人 河川管理局, 1-9.
- 落合ゆかり(2009), 洞爺湖中島におけるエゾシカが森林内物質動態に及ぼす影響, 酪農学園大学環境システム学部 生命環境学科 生態系物質循環研究室 卒業論文.
- Pavel, A., E. D. Kaister, S. Balan, S. Radan, S. Sobek, B. Wehrli (2009), Sources and emission of greenhouse gases in Danube Delta Lakes, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 16, S86-S91 DOI 10.1007/s11356-009-0182-9.
- Reeburgh, W. S., Heinrich D. H., Karl K. T. (2007), Global methane biogeochemistry. In: Keeling R. F. (ed) *Treatise on Geochemistry*, 4. *The Atmosphere*. Pergamon, Oxford, pp. 1-32.
- Seizinger, S. P. (1988), Denitrification in freshwater and coastal marine ecosystems: Ecological and geochemical significance. *Limnol. oceanogr.* 33, 702-724.
- 社団法人 日本水環境学会 (2006), *水環境ハンドブック*, pp. 37-58, 朝倉書店 東京.
- 洞爺湖町 (2007), <http://g8-summit.town.toyako.hokkaido.jp/> 2012/12/27.
- Walter, K. M., Zimov S. A., Chanton J. P., Verbyla D., Chapin F. S. (2006), Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming. *Nature*, 443, 71-75.
- 吉田 磨, 今井 翔, 窪田千穂 (2011) 地球の測り方, — 中原准一教授退職記念論文集 — 酪農学徒として考えてきたこと —, 159-169.
- 吉田 磨, 林えれな, 吉田剛司, 加藤康大, 室田欣弘(2009), 洞爺湖及び流出河川におけるメタンの分析, *J. Rakuno Gakuen Univ.*, 34, 47-68.

Abstract

There remain large uncertainties in the estimated methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) fluxes from the sources to the sinks. The lake source strength for atmospheric CH₄ and N₂O should be examined in more detail. We investigated the distribution of the greenhouse gases (methane and nitrous oxide) from the different aquatic environment of Lake Toya. The CH₄ concentration in the deeper layers (>30 m) was high below thermocline and the highest in the riverine input region. In the area which is not affected the river water, CH₄ and N₂O concentrations were the highest near the bottom. It was suggested that the lake sediment has influenced CH₄ production and the N₂O production was under oxic-anoxic interface in the sediment interstitial water.