



Title	尾瀬ヶ原湿原における温室効果ガス放出に及ぼすニホンジカの攪乱の影響
Author(s)	犬伏, 和之; Inubushi, Kazuyuki; 中山, 絹子 他
Citation	低温科学, 80, 483-489
Issue Date	2022-03-31
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.80.483
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/84940
Type	departmental bulletin paper
File Information	36_p483-489_LT80.pdf



尾瀬ヶ原湿原における温室効果ガス放出に及ぼす ニホンジカの攪乱の影響

犬伏 和之¹⁾, 中山 絹子¹⁾, 重田 遥¹⁾, 八島 未和¹⁾, 坂本 充²⁾

2021年9月30日受付, 2021年11月11日受理

尾瀬ヶ原は日本最大の高山泥炭湿原であり、貴重な泥炭生態系として保全されてきた。しかし20世紀後期からニホンジカの侵入と豪雨による洪水による生態系の攪乱が顕在化してきた。本稿では二酸化炭素 (CO₂) やメタン (CH₄) 放出に関する既往の研究と尾瀬ヶ原湿原におけるニホンジカの攪乱が及ぼす影響を概観する。尾瀬ヶ原, 中田代の5か所, 14地点で2019年6~10月の5か月間に土壌およびガス試料を採取・分析した。攪乱によるアンモニア態窒素の増加が認められた。非攪乱地のCO₂やCH₄放出は8月に極大が見られ攪乱地より多かった。CO₂やCH₄放出量は地下水位と負の相関関係が見られ、尾瀬ヶ原におけるニホンジカの攪乱が地下水位と泥炭土壌の理化学性および温室効果ガスの放出に顕著な影響を及ぼしていることが示された。

Emission of greenhouse gases influenced by Sika deer disturbance in Ozegahara mire

Kazuyuki Inubushi¹, Kinuko Nakayama¹, Haruka Shigeta¹, Miwa Yashima¹, Mitsuru Sakamoto²

Ozegahara mire is the largest alpine mire in Japan. The mire has been preserved as a precious peatland ecosystem with high ecological diversity. After the late 20th century, the mire has been exposed to ecosystem disturbance by mire flooding due to heavy rain as well as invasive Sika deer. This manuscript reviewed studies about greenhouse gas emission from wetland and report the effects of Sika deer disturbance on the soil physicochemical properties and the emission of carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) from Ozegahara mire. Soil and gas samples were collected at fixed 14 fixed plots on 5 sites with and without mire disturbance by Sika deer in Naka-tashiro of Ozegahara mire through 5 months of 2019 (June to October), and determined their properties and gas composition each month. Groundwater level displayed similar seasonal change in two sites, being affected by precipitation. The concentrations of NH₄⁺ nitrogen in the disturbed sites were higher than those in the undisturbed sites. Mechanical disturbance of the peat soils by deer resulted in mineralization of organic matter. CO₂ and CH₄ fluxes from the undisturbed sites were highest in August, and those were higher than those from the disturbed sites. Negative correlation was found between CO₂ and groundwater level and also correlation between CH₄ and groundwater level was negative, suggesting the importance of groundwater level in greenhouse gases flux, depending on the sites and also species of greenhouse gases.

キーワード：ガスフラックス, 地下水, メタン, 泥炭土壌, シカ
gas flux, ground water level, methane, peat soils, sika deer

責任著者

犬伏 和之

〒271-8510 松戸市松戸648

千葉大学大学院園芸学研究院

Tel : 047-308-8816 Fax : 047-308-8720

e-mail : inubushi@faculty.chiba-u.jp

1) 千葉大学大学院園芸学研究院

2) 名古屋大学・滋賀県立大学, 名誉教授

1 Graduate School of Horticulture, Chiba University,
Matsudo, Japan

2 Nagoya University and University of Shiga Prefecture;
Emeritus Professor

1. はじめに

産業革命以降、大気中の温室効果ガス濃度が上昇を続け、温暖化をはじめ様々な地球環境変動が顕在化している (IPCC, 2014)。温室効果ガスのうち最大の寄与を持つとされる二酸化炭素は主要な人為的発生源が化石燃料消費とされるが、吸収機能をもつ森林面積の減少も大気中二酸化炭素 (CO_2) の増加に繋がると考えられている。一方、陸域の土壌中の炭素量は大気中二酸化炭素量の3倍近くになると推定される炭素の貯留庫であるが、土地利用変化で土壌炭素の減少も指摘されている。特に湿原における泥炭土壌は分布面積では世界陸域の3パーセントに過ぎないが、炭素量は15–25%を占め (Batjes, 1996)、その開発は土壌炭素の減少を加速化すると懸念されている (Hatano et al., 2015)。

人口増加で引き起こされた土地利用変化によって自然湿原であったところが農耕地化して、温室効果ガス、特に水田ではメタン (CH_4) の、また畑地では一酸化二窒素 (N_2O) の放出源となっている場合も報告されている (Regina et al., 1996; Hadi et al., 2001; 2002; 永田, 2006)。また極域湿地帯でも永久凍土中に蓄えられたメタンが、温暖化によって融解して大気中に放出されることが懸念されている一方、メタン酸化も起こっていることが示された (Nagano et al., 2018)。また湿地や水田の嫌気的な土層で嫌気性メタン生成菌によって生成されたメタンが、地表付近の好気的な土層で好気性メタン酸化菌によってメタン酸化されることも知られている (Inubushi et al., 1998; Arai et al., 2014)。

植生の温室効果ガス放出への影響としては、 CO_2 が明条件では光合成によって吸収され、土壌炭素の蓄積に繋がるが、暗条件では呼吸により放出され土壌有機物の分解に加算される。 CH_4 は水稻や湿性植物の体内を経由して大気中に放出される (犬伏ほか, 1989; Rejmánková et al., 2011; Bhullar et al., 2013) 一方、湿性植物の根域や体内でメタン酸化されている (Inubushi et al., 2001; Bhullar et al., 2013)。北海道の3つの湿原において CO_2 放出量の日変化は認められたが CH_4 では認められなかった (浦安ほか, 1998)。また釧路湿原において植生の違いが温室効果ガス動態に及ぼす影響が調べられ、ハンノキの侵入が増加している湿地林で CH_4 や N_2O 放出量の増加を認めている (吉田ほか, 2016)。また汽水域の湿地であるマングローブでも耐塩性植物の植生密度に比例した CH_4 放出量が見いだされているが、潮位変化による影響も大きいことが示されている (Arai et al., 2016, 2021)。

2. 尾瀬における既往の温室効果ガス関係の知見

尾瀬ヶ原は日本最大の高山泥炭湿原であり、高い生態系多様性を有した貴重な泥炭生態系として保全されてきた。約20年ごとに行われてきた尾瀬総合学術調査では、第3次で初めて鶴田ほか (1998) が上田代、中田代、下田代の CH_4 放出量や土壌溶液中の溶存ガス濃度などを測定し、地点差や深さ別の解析を進めた。図1は下田代の土壌中の深さ別溶存ガス濃度変化を示したが、地下水位10 cm以下では溶存 CH_4 や CO_2 量が高く、表層付近では濃度が低下しており、土壌水分やメタン酸化の影響が考察された。一方、溶存 N_2O 量は表層付近で増加しており、洪水による土砂流入と栄養塩が富化された影響が考えられた。また和田ほか (1998) は上田代と中田代の土壌中の深さ別メタン生成菌とメタン酸化菌の分布を調べ、下層ではメタン生成菌が多く、表層ではメタン酸化菌が多くなっていることを示した (図2)。

森本ほか (2009) は北海道、美唄の泥炭試験地で深さ別の温室効果ガス濃度に及ぼすガス生成と消費や積雪の影響を調査しており、ガスの種類によって影響が大きく異なることを示している。すなわち CO_2 、 N_2O は深い

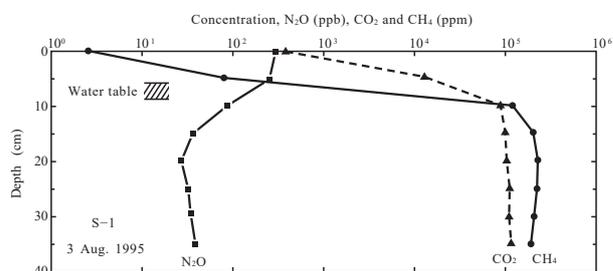


図1：尾瀬ヶ原（下田代）湿原土壌水中の溶存 CO_2 、 CH_4 、 N_2O の濃度の鉛直分布を示す。（鶴田ほか, 1998）

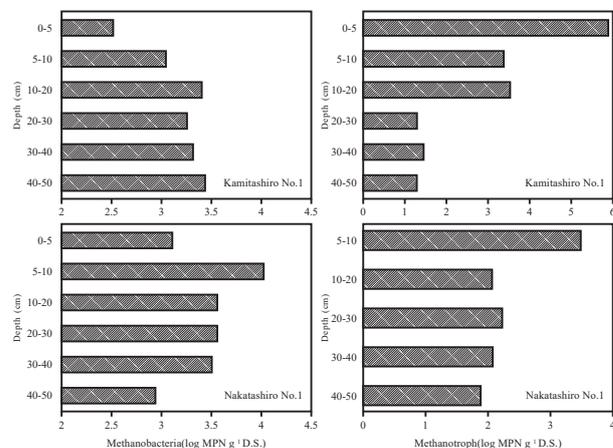


図2：尾瀬ヶ原（上田代・中田代）湿原土壌中のメタン生成菌（左）とメタン酸化菌（右）の鉛直分布を示す。（和田ほか, 1998）

ほど濃度が高くなる傾向にあった一方、 CH_4 は地表面の濃度が高く、下層土ではそれより低い傾向にあった。積雪期には CO_2 、 CH_4 の生成・消失ほとんどなかったが、 N_2O では積雪期の生成・消失が盛んであったと報告している。

一方、Inubushi et al. (2005) は尾瀬ヶ原泥炭とインドネシア泥炭およびカナダ泥炭とを比較し、現地での CH_4 放出量は現地から採取した土壌を培養して測定した CH_4 生成活性と比例したが、 CH_4 生成活性と土壌 pH との間には異なる相関関係が認められた (図3)。尾瀬ヶ原土壌の pH 範囲はインドネシア泥炭土壌よりやや高く、カナダ土壌と一部が重なるが、同じ pH 領域でも CH_4 生成活性は尾瀬ヶ原のほうが2~3桁高く、 CH_4 生成菌の最適 pH など生理的性質が異なっている可能性が推察される。また農耕地の泥炭土壌へは石灰施用などで pH を矯正すると CH_4 生成活性が高まった (Murakami et al., 2010)。なお自然湿地の泥炭土壌の空間変動は大

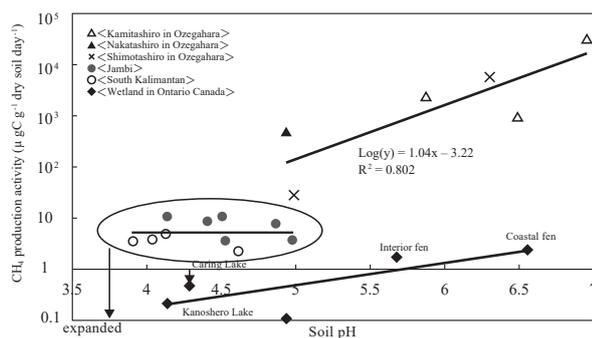


図3：尾瀬ヶ原泥炭とインドネシア泥炭およびカナダ泥炭におけるメタン生成活性と土壌 pH との関係を示す。(Inubushi et al., 2005)

きいことがオランダの例でも示されている (Dasselaar et al., 1997)。

3. 第4次尾瀬総合学術調査での温室効果ガス関係の成果と今後の課題

尾瀬ヶ原では20世紀後期からニホンジカの侵入と豪雨による洪水による生態系のかく乱が顕在化してきた。特にニホンジカによる湿原植生の食害と掘り返しは植生だけでなく泥炭土壌の生化学的性質に深刻な影響を与えており、その結果、微生物活性や養分動態にも変化が起こっている。しかし湿原の温室効果ガス放出への洪水とニホンジカの攪乱の影響についての知見は限られている。本章では尾瀬ヶ原湿原における CO_2 や CH_4 放出に関する第4次尾瀬総合学術調査での研究を概観しニホンジカの攪乱が及ぼす影響を概説し、今後の研究を展望する。

2019年6~10月の5か月間、約1か月おきに尾瀬ヶ原、中田代の牛首付近4か所(図4)におけるニホンジカの攪乱の有無による14地点で土壌およびガス試料を採取した。土壌試料は移植ごてで採取し理化学性を分析し、ガス試料は塩ビ製円筒チャンバーで捕集しガスクロマトグラフィーで定量し、地下水水位は各地点に設置したパイプで測定した (Nakayama et al., 2022)。攪乱地でアンモニア態窒素が7月末から8月および9月末から10月にかけて増加が認められた(図5)。ニホンジカによる物理的攪乱が泥炭有機物の分解を促進したほか排泄行動や泥炭地以外からの有機物の持ち込み*などの影響も推察される。非攪乱地の CO_2 や CH_4 放出は8月に極大が

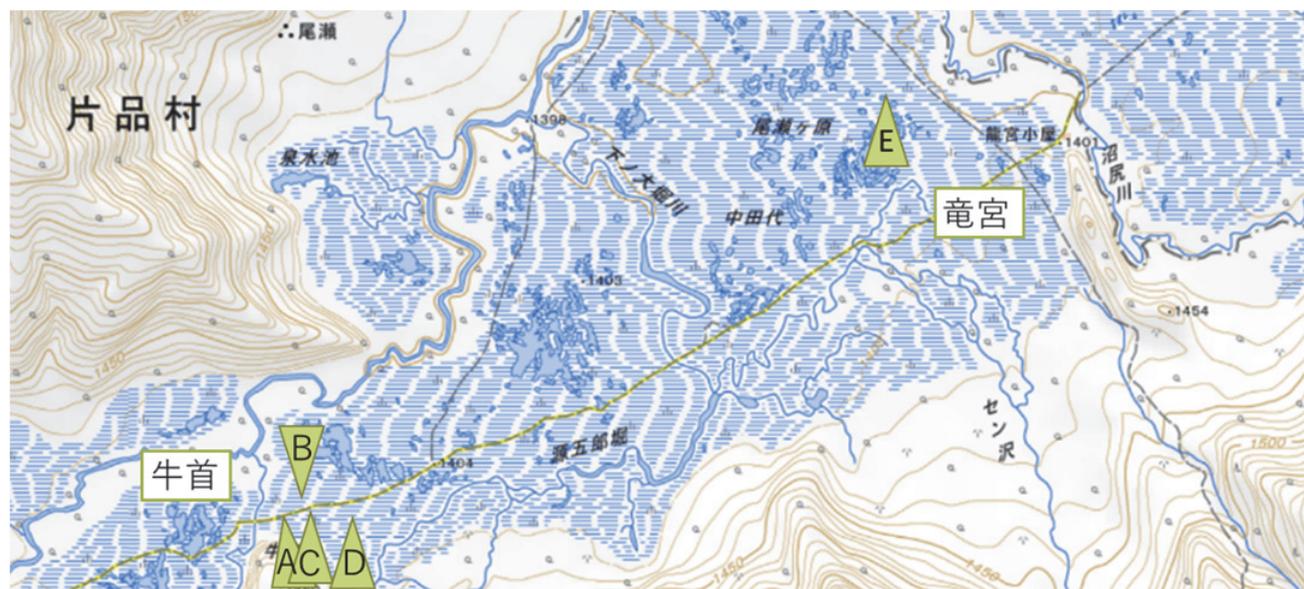


図4：第4次尾瀬総合学術調査における温室効果ガス関係試料採取地点

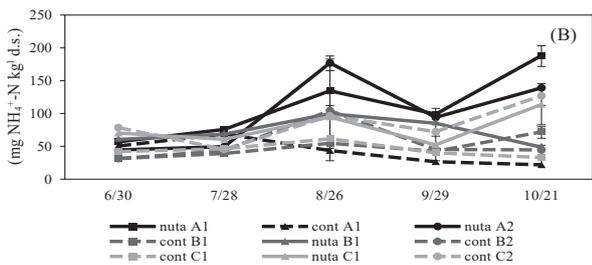


図5：尾瀬ヶ原湿原土壌中のアンモニア態窒素の季節変化を示す（実線が攪乱区 (nuta), 破線が非攪乱区 (cont) の平均値, エラーバーは標準偏差）. (Nakayama et al., 2022)

見られ攪乱地より多かった。CO₂ 放出量は地下水位と負の相関関係 ($r = -0.327, p < 0.05$) が見られ (図 6a), また CH₄ 放出量も地下水位と負の相関関係 ($r = -0.453, p < 0.05$) が見られた (図 6b) が, CO₂ 放出量や CH₄ 放出量と地温の関係の関係は有意ではなく, 温室効果ガスへの地下水位の影響はガスの種類が重要であることを示唆している。[* 攪乱地での土壌全炭素および窒素の安定同位体存在比の分析結果は, 来訪者の影響を受けやすい木道沿いのそれらの結果 (Akagi and Osawa (2004)) と同様に, 泥炭有機物の全炭素および窒素安定同位体存在比とは異なる傾向を示した (Shigeta et al., 2022).]

同様な温室効果ガスと地下水位の関係はインドネシアの泥炭地 (Furukawa et al., 2005) や, 水位を制御した泥炭土壌カラム試験 (Susilawati et al., 2016) でも見いだされているが, 泥炭土壌での温室効果ガスに及ぼす地下水位の影響には泥炭の種類やガスの種類によって異なる

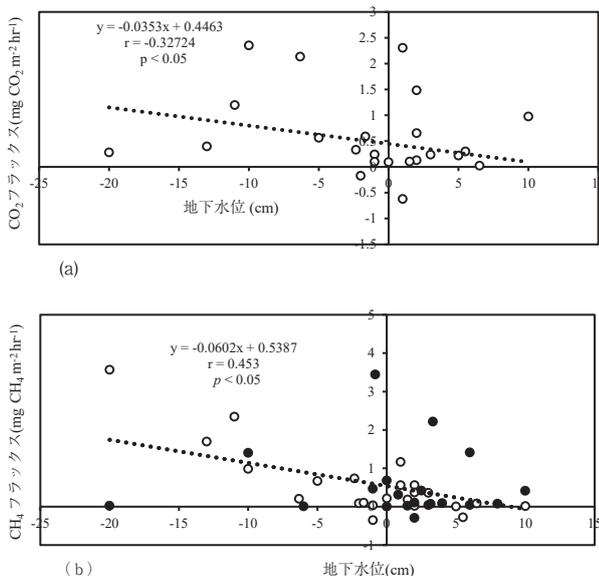


図6：尾瀬ヶ原 (中田代) 湿原における地下水位と CO₂ フラックス (a) および CH₄ フラックス (b) との関係を示す。○が攪乱区, ●が非攪乱区)

る傾向が認められる。すなわち熱帯泥炭では CH₄ 放出量は地下水位と負の相関関係が見られたのに対し, CO₂ 放出量は尾瀬ヶ原と同様に地下水位と正の相関関係 (Furukawa et al., 2005) を示した。その原因の1つとして熱帯泥炭は木質の分解物が蓄積しているのに対して, 尾瀬ヶ原や寒冷地の泥炭は草本植物由来であること (Hadi et al., 2000; Inubushi et al., 2003, 2005) が考えられる。

同時期に本調査と並行して行われた洪水の影響調査では, 洪水頻度の低い中田代東部, 竜宮付近の試料 (E) も加えてメタン生成活性を嫌気培養法 (Inubushi et al., 2005) で測定し, ニホンジカの攪乱と洪水のメタン生成への影響を調べ, 上述の洪水影響を受けやすい牛首付近の試料 (A ~ D) と比較した (Nakayama et al., 2022)。その結果, メタン生成活性が洪水・非攪乱 ≧ 洪水・攪乱 ≧ 非洪水・非攪乱 > 非洪水・攪乱の順で高い傾向が認められた (図 7)。2つの影響因子に関して分散分析の結果, 交互効果なし・主効果あり, との結果が得られ, 洪水と攪乱それぞれの影響を受けていることが明らかになった (図 8)。さらに泥炭土壌試料の理化学性 (重田ほか, 2021) とメタン生成活性との関係について主成分分析の結果, 第一主成分としては土壌水分量と土壌炭素量の正の寄与, 灰分や鉄含量の負の寄与が多いため, 未分解の有機物が多く嫌気性メタン生成活性も高いことから土壌中に存在する有機物量の影響が大きく, 第二主成分では土壌 pH の寄与が大きく, 有機物の分解が進み, 無機態窒素量が多く存在するため pH が上昇したため, 有機物の分解度合に応じた灰分含量の増加によってメタン生成活性の低下が説明された ($p < 0.001$) (図 9)。一般に泥炭の分解が進むにつれて灰分含量は増加する (Kazemian et al., 2011) ことから, 土壌中の有機物量が少なくなるほど相対的に灰分含量が増加し, メタン生成活性が抑制

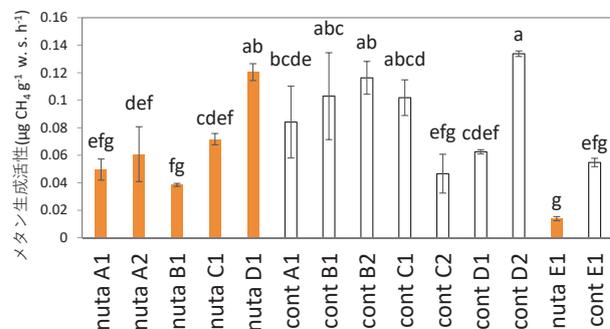


図7：尾瀬ヶ原湿原 (洪水の影響を受けやすい中田代牛首付近 A から D と洪水の影響を受けにくい中田代竜宮付近 E 地点) における CH₄ 生成活性。 (■が攪乱区 (nuta), □が非攪乱区 (cont))。異なるアルファベット記号には有意差あり ($p < 0.05$)。

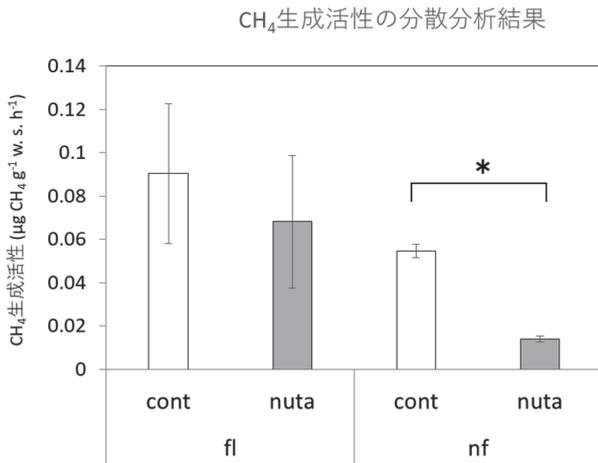


図8：洪水の影響が大きい牛首付近 (fl) と影響の小さい竜宮付近 (nf) におけるニホンジカの攪乱区 (nuta) と非攪乱区 (cont) での CH₄ 生成活性に及ぼす洪水と攪乱の効果の分散分析の結果を示す。

	成分1	成分2	成分3	成分4
moisturecontent	0.876711	0.244788	0.191595	0.210281
pH	-0.09299	0.907842	0.155109	-0.02342
EC	-0.08136	-0.26382	-0.75956	0.509247
NO ₃	0.514166	0.675951	0.302345	0.263719
NH ₄	-0.08728	0.699395	-0.53004	-0.00027
ash	-0.92094	0.273759	0.138459	0.135731
TC	0.917923	-0.23826	-0.17304	-0.14523
TN	0.703946	0.195793	-0.47781	-0.40751
CNratio	0.593179	-0.58013	0.318281	0.298602
iron	-0.8038	-0.30152	0.073094	-0.35027
CH ₄ production	0.623205	-0.00547	0.121303	-0.31165

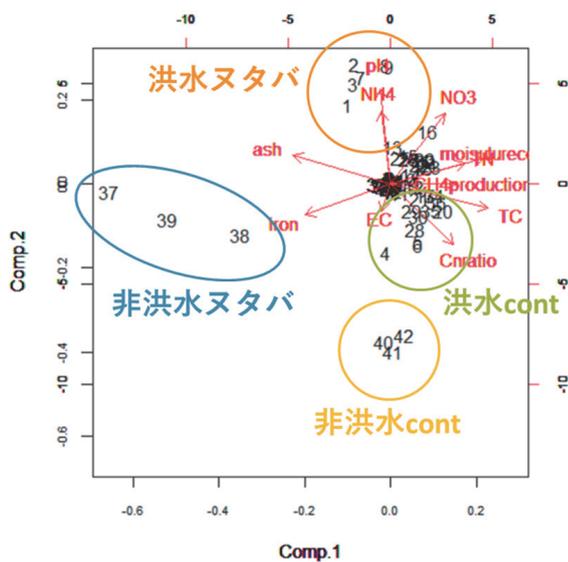


図9：主成分分析結果（主成分負荷量：上と Biplot：下；分析第一主成分…土壌に存在する有機物量（寄与率 42.0%）第二主成分…有機物の分解度合（寄与率 22.7%）

されたと考えられる。以上より、湿原への洪水影響の違いから有機物供給と分解に変化が生じ、有機物量が相対的に低下し土壌灰分含量が増加して、CH₄ 生成活性が低下したと判断された。

さらにニホンジカの攪乱によって、常田ほか (2006) が指摘するような泥炭土壌の分解促進と鎮圧による地下水位の変化や、攪乱時のバブル評価や裸地化による地温上昇の影響 (van Winden et al., 2012)、窒素固定活性や脱窒活性、泥炭有機物の炭素窒素安定同位体存在比の変化 (Shigeta et al., 2021) を通じた物質代謝や生態系全体への影響にも注意する必要がある。今後の学術調査に期待したい。

また泥炭湿地と似た湛水環境が優占する水田では、水稻体がメタンの大気への主な放出経路となっているため、メタン放出量の測定には水稻体全体が入る高さ 1メートルのチャンバーを用いる (犬伏ほか, 1989)。一方、これまでの本研究では、地表面の背の低い植生を覆う高さ 15 cm 程度のチャンバーを用いてきた。湿性植物には水稻同様にメタンの大気への放出経路となっている可能性が指摘されている (Inubushi et al., 2001)。例えばマングローブ林に生育する耐塩性植物では茎数とメタン放出量に正比例関係が認められた (Arai et al., 2021)。また北海道東部の湯沸湖周辺の湿地林やインドネシアの湿地林でも植物体経由のメタン放出が認められている (寺澤ほか, 2018; 則定ほか, 2012; Sakabe et al., 2018)。尾瀬ヶ原でもヤチヤナギなど面積が拡大している灌木が温室効果ガスに及ぼす影響を今後、調査する必要があると考えられる。

もう一つ重要な温室効果ガスで成層圏オゾン層の破壊にも関わる N₂O の放出は今回の調査では確認できなかった。しかし Shigeta et al. (2021) はニホンジカの泥炭層の攪乱が窒素固定や脱窒など窒素代謝にも影響することを明らかにしており、洪水の影響も見いだされた (重田ほか, 2021)。またインドネシアの泥炭地では開発に伴う排水過程で、地下水位 20 cm 付近で N₂O 放出量の極大が観察されている (Furukawa et al., 2005)。今後、N₂O 放出についても調査を継続して行く必要がある。

4. まとめ

本稿では湿原における温室効果ガスの既往知見を概観するとともに、第4次尾瀬総合学術調査の結果で尾瀬ヶ原におけるニホンジカの攪乱が泥炭土壌の理化学性および温室効果ガス CH₄ や CO₂ の放出に顕著な影響を及ぼしていることを示した (図 10)。この概念図に示すよう

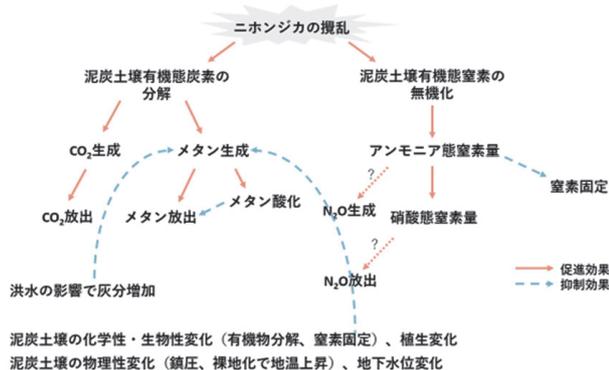


図 10: 尾瀬ヶ原湿原におけるニホンジカの攪乱が温室効果ガス放出へ及ぼす影響 (概念図)

にニホンジカの攪乱の温室効果ガス放出に及ぼす影響は様々な因子や反応を経由して相互に関連しており、網羅的な総合研究が必要と考えられる。ニホンジカの尾瀬ヶ原への侵入頭数は最近、わずかに減少傾向にあるようだが攪乱された植生の回復には時間を要すると考えられる。今後は、温室効果ガス動態に及ぼす植生や関連微生物の影響を調査するとともに、尾瀬ヶ原においても岩田 (2012) が指摘するように積雪期や融雪期を含めた温室効果ガスの長期的動態調査も必要と考えられる。

謝辞

この調査研究は、第4次尾瀬総合学術調査の一環として、環境省の生物多様性保全推進事業費を用いて行われた。関係省庁、尾瀬保護財団および調査に協力してくれた千葉大学園芸学部学生・園芸学研究院院生諸君に心よりお礼申し上げます。

引用文献

- Akagi, T., and K. Osawa (2004) Possible Input of Nitrogen of Visitors' Origin on a Protected Peatland. *Environ. Manag.*, **35** (4), 461-467.
- Arai, H., A. Hadi, U. Darung, S.H. Limin, R. Hatano, and K. Inubushi (2014) A methanotrophic community in a tropical peatland is unaffected by drainage and forest fires in a tropical peat soil. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **60**, 4, 577-585.
- Arai, H., R. Yoshioka, S. Hanazawa, V.Q. Minh, V.Q. Tuan, T.K. Tinh, T.Q. Phu, C.S. Jha, S.R. Rodda, V.K. Dadhwal, M. Mano, and K. Inubushi (2016) Function of the methanogenic community in mangrove soils as influenced by the chemical properties of the hydrosphere. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **62**, 2, 150-163.
- Arai, H., K. Inubushi, and C.Y. Chiu (2021) Dynamics of

methane in mangrove forest: will it worsen with decreasing mangrove forests?, *MDPI, Forests*, **12** (9), 1204.

- Batjes, N.H. (1996) Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Euro. J. Soil Sci.*, **47**, 151-163.
- Bhullar, G. S., P. J. Edwards, and H. O. Venterink. (2013) Variation in the plant-mediated methane transport and its importance for methane emission from intact wetland peat mesocosms". *J. Plant Ecol.*, **6** (3), 298-304.
- Dasselaar A.V.D.P., M. Beusichem, and O. Oenema (1997) Determinants of spatial variability of methane emissions from wet grasslands on peat soil. *Biogeochem.* **44**, 221-237
- Furukawa Y., K. Inubushi, M. Ali, M. Itang, and H. Tsuruta (2005) Effect of changing groundwater levels caused by land-use changes on greenhouse gas fluxes from tropical peat lands. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, **71**, 81-91.
- Hadi, A., M. Haridi, K. Inubushi, E. Purnomo, F. Razie, and H. Tsuruta (2001) Effects of land-use change in tropical peat soil on the microbial population and emission of greenhouse gases. *Microb. Environ.* **16** (2), 79-86.
- Hadi, A., K. Inubushi, E. Purnomo, F. Razie, K. Yamakawa, and H. Tsuruta (2000) Effect of land-use changes on nitrous oxide (N₂O) emission from tropical peatlands. *Chemosphere - Global Change Sci.*, **2**, 347-358.
- Hadi, A., K. Inubushi, E. Purnomo, and H. Tsuruta (2002) : Effect of hydrological zone and land-use management on the emissions of N₂O, CH₄, and CO₂ from tropical peatlands. *Agroscentia*, **9**, 53-60.
- Hatano, R., Y. Toma, Y. Hamada, H. Arai, H. L. Susilawati, and K. Inubushi (2015) Methane and Nitrous Oxide Emissions from Tropical Peat Soil. In Osaki Mitsuru, Tsuji Nobuyuki (Eds.) *Tropical Peatland Ecosystems*: 339-351, Springer, Japan
- Inubushi, K., A. Hadi, M. Okazaki, and K. Yonebayashi (1998) Effect of converting wetland forest to sago palm plantation on methane gas flux and organic carbon dynamics in tropical peat soil. *Hydrol. Proc.*, **12** (13-14), 2073 - 2080.
- Inubushi K., Y. Furukawa, A. Hadi, E. Purnomo, and H. Tsuruta (2003) Seasonal changes of CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in relation to land-use change in tropical peatlands located in coastal area of South Kalimantan. *Chemosph.*, **52**, 603-608.
- Inubushi K., S. Otake, Y. Furukawa, N. Shibasaki, M. Ali, A.M. Itang, and H. Tsuruta (2005) Factors influencing methane emission from peat soils: Comparison of tropical and temperate wetlands. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, **71**, 93-99.

- Inubushi, K., H. Sugii, S. Nishino, and E. Nishino (2001) Effect of aquatic weeds on methane emission from submerged paddy soil. *American J. Botany*, **88** (6), 975-979.
- 犬伏和之・堀 謙三, 松本 聡, 梅林正直, 和田秀徳 (1989) 水田生態系におけるメタンの動態 (第1報) 水稻体を経由したメタンの大気中への放出. *土肥誌*, **60** (4), 318 - 324.
- IPCC (2014) AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- 岩田智也 (2012) 積雪期における湿地からのメタン放出過程. *低温科学*, **70**, 137-144.
- Kazemian, S., B.B. K. Huat, A. Prasad, and M. Barghchi (2011) A state of art review of peat: Geotechnical engineering perspective. *Intl J Phys. Sci.*, **6** (8), 1974-1981.
- 森本 聡, 永田 修, 川本 健, 長谷川周一 (2009) 泥炭林土壌の温室効果ガスの生成と消失. *土壤物理*, **113**, 3-12.
- Murakami, M., Y. Furukawa, and K. Inubushi (2010) Methane production after liming to tropical acid peat soil. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **51** (5), 696-699.
- Nagano, H., Y. Kim, B.-Y. Lee, H. Shigeta, and K. Inubushi (2018) Laboratory examination of greenhouse gaseous and microbial dynamics during thawing of frozen soil core collected from a black spruce forest in Interior Alaska. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **64** (5) 793-801.
- 永田 修 (2006) 泥炭地・湿原における温室効果ガス. *土壤物理*, **104**, 85-95.
- Nakayama, K., K. Inubushi, M. Yashima, and M. Sakamoto (2022) Effects of mire disturbance by Sika deer on physicochemical properties of peat soils and greenhouse gas flux in Ozegahara Mire, Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **68** (1), 27-34.
- 則定真利子, 山ノ下 卓, 小島克己 (2012) 熱帯泥炭湿地の生育する *Melaleuca cajuputi* の樹体からのメタン放出. 第123回日本森林学会大会
- Regina K., H. Nykänen, J. Silvola, and P.J. Martikainen. (1996) Fluxes of nitrous oxide from boreal peatlands as affected by peatland type, water table level and nitrification capacity. *Biogeochem.*, **35**, 401-418.
- Rejmánková E. (2011) The roles of macrophytes in wetland ecosystems. *J. Ecol. Field Biol.* **34** (4), 333-345.
- Sakabe A., M. Itoh, T. Hirano, and K. Kusin (2018) Ecosystem-scale methane flux in tropical peat swamp forest in Indonesia. *Global Change Biol.* **24** (11) : 5123-5136.
- 重田 遥, 中山絹子, 八島未和, 犬伏和之, 坂本 充 (2021) 尾瀬ヶ原における泥炭土壌系の物理化学的性状・窒素代謝特性と洪水影響. *陸水学雑誌*, **82** : 239-256
- Shigeta, H., K. Nakayama, K. Inubushi, M.M. Yashima, and M. Sakamoto (2022) Effects of mire disturbance by Sika deer on nitrogen fixation and denitrification in Ozegahara Mire, Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.* (in press)
- Susilawati, H.L., P. Setyanto, M. Ariani, A. Hervani, and K. Inubushi (2016) Influence of water depth and soil amelioration on greenhouse gas emissions from peat soil columns. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **62**, 57-68
- 寺澤和彦, 小川 舞, 川和美香, 阪田匡司, 石塚成宏 (2018) ハンノキ湿地林における樹幹からのメタン放出量とその変動要因. 第129回日本森林学会大会, P2-195.
- 鶴田治雄, 米村祥央, 蓑毛康太郎, 楊 宗興, 赤木 右, 和田幸絵, 犬伏和之, Abdul Hadi, 杉井穂高, 木平英一 (1998) 尾瀬ヶ原におけるメタン発生. 尾瀬の総合研究, p. 192-216.
- 常田岳志, 宮崎 毅, 溝口 勝 (2006) 泥炭地湿原におけるメタンバブルの存在, 挙動とその役割. *農土誌*, **74** (7), 595-598.
- 浦安 功, 荒川 豊, 深澤達矢, 清水達雄, 橘 治国, 工藤憲三 (1998) 湿原からのメタン放散. *衛生工学シンポジウム集*, (6), p. 252-257.
- 和田幸絵, Abdul Hadi, 杉井穂高, 犬伏和之 (1998) 尾瀬湿原の泥炭物性, 特にメタンの生成, 酸化能力. 尾瀬の総合研究, p. 218-229.
- van Winden J. F., G. Reichart, N.P. McNamara, A. Benthien, and J. S. S. Damsté (2012) Temperature-induced increase in methane release from peat bogs: A mesocosm experiment. *PLOS ONE* **7** (6), e39614.
- 吉田 磨, 井村大地, 千田幹太 (2016) 釧路湿原における湿原毎の温室効果気体の動態. *酪農学園大紀要*, **40**, 87-95.