

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：24201

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K15586

研究課題名（和文）酸性雨と温暖化の相互作用が湖沼生態系に与える影響の評価

研究課題名（英文）Effects of acid rain and global warming on lake ecosystem

研究代表者

リュウ キン (Liu, Xin)

滋賀県立大学・環境科学部・研究員

研究者番号：10843360

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：異なる水温条件における湖沼の動物プランクトンの致死酸性条件と生理応答を調べ、pH低下が湖沼の動物プランクトンの成長や個体群増殖に与える影響を評価した。酸性条件における動物プランクトンの生理応答は種類によって異なったが、湖沼酸性化がカイアシ類の個体群増殖に強い負の影響を与えた。一方、酸性条件における動物プランクトンの高致死率は、低温条件より、高温条件の方が緩和され、動物プランクトンの致死酸性pHは水温に依存することが分かる。湖沼の酸性化が動物プランクトンの個体群組成に影響を与え、それに伴う低次栄養段階生物の群集組成変化を介して、高次栄養段階生物への影響を及ぼす可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水圏生態系においては、人為的影響による海洋酸性化と温暖化がもたらす影響評価に関する研究も既に数多く行われている。しかし多くの場合、これらは個別に評価されており、それらの相互作用を調べた研究は国内外を問わず極めて少ない。本研究は水温上昇が低pH耐性に与える影響を評価する点において、これらのギャップを埋める重要な役割を担っている。本研究は水温上昇が動物プランクトンのpH耐性に与える影響を明らかにした初めての研究であり、環境変動に対する動物プランクトンの生理的応答に関する新知見を得たものである。本研究成果によって、人為的な水域の酸性化と温暖化が水域生態系に与える影響を評価することができるようになる。

研究成果の概要（英文）：This study investigated the lethal acidity and physiological response of freshwater zooplankton under different water temperature conditions, clarified the effects of acidification on their somatic and population growth. Although the physiological responses of zooplankton under acidic conditions varied among species, acidification may have a negative impact on copepod population growth. Conversely, the high mortality rate of zooplankton under low pH was mitigated at higher temperatures compared to lower temperatures. These results indicate that the lethal acidity for zooplankton depends on temperature. Lake acidification could affect the population composition of zooplankton, potentially influencing higher trophic level organisms through changes in the composition of lower trophic level organisms.

研究分野：水圏生態学

キーワード：酸性化 温暖化 二次生産 動物プランクトン 生活史特性 pH 湖沼生態系 琵琶湖

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

酸性雨原因物質排出量の増加に伴う湖沼の酸性化は、1960年代以降、欧米各地で生物多様性の減少や個体群構造の変化など深刻な被害をもたらしてきた。日本では、1980年～2000年代に、欧米と同程度か、あるいはそれ以上の酸性雨が降り続いた。しかし、日本の土壌が比較的大きい酸緩衝能を持っていたため、これまでに顕著な被害例は報告されていない(阿賀裕英 2006)。一方で、近年の中国や東アジア諸国における著しい経済発展は、化石燃料の燃焼による SO_x や NO_x など酸性雨原因物質排出量の増加をもたらし、これが日本国内の河川や湖沼、その周辺土壌を酸性化しつつあるとの報告もある(Miyanaga and Ikeda 1998)。これとは別に、人為的地球温暖化の進行はいまだ勢い衰えず、今世紀末までに、海洋や湖沼における表層水温は、約3度上昇すると試算している(IPCC 2019)。水生生物の生理的応答は水温依存のため、水温上昇による湖沼の理化学的環境の変化は、生物全体に大きな影響を及ぼす恐れがある(Magnuson et al. 1997)。従って、将来的には酸性化と温暖化の複合影響が、水生生物の生理的応答を通して、湖沼生態系の調和を崩す可能性が懸念される。動物プランクトンは、魚類などの高次栄養段階生物の主な餌資源として水圏生態系において重要な役割を担っている。それらは環境変化に極めて敏感であり、環境変動の指標生物として用いることができる。湖沼生態系では、海洋生態系に比べて、pH や水温の変動が激しいため、そこに生息する動物プランクトンは、広い温度・pH 範囲に適応して生存している(Amano et al. 1997; Liu et al. 2014)。しかし、温暖化に伴う水温上昇は、それらの代謝コストを増加させることで、低 pH に対する耐性を低下させる可能性がある。従って、水温上昇がこれら動物プランクトンの酸性化耐性に及ぼす生理的応答を評価することは重要である。

動物プランクトンの成長と代謝は、水温と pH に強く影響を受ける。即ち、成長速度は水温上昇に伴って短縮し、生産速度は増加するが(Bonnet et al. 2009)、水温上昇に伴う代謝コストの増加は、成長効率の低下を招く(Ikeda et al. 2001)。一方、pH の低下によって、成長時間は延長し、再生産の低下することが分かっている(Cao et al. 2015)。しかし、成長や代謝に対する温度と pH の複合影響に関する研究は極めて少ない。予測される温暖化と酸性化の水圏生態系への影響を評価するためには、これら成長および代謝に対する温度と pH の相互作用を詳しく調べる必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、湖沼の動物プランクトンについて、pH 低下に対する成長と代謝速度の応答能が、水温上昇によってどのように変化するのか明らかにすることを目的とする。これによって、酸性雨と温暖化の相互作用が湖沼の動物プランクトン生産に与える影響を評価できるようになる。

3. 研究の方法

本研究では、酸性化と温暖化が湖沼の動物プランクトンの成長と代謝速度に与える影響を明らかにするため、以下の2つのサブテーマ毎に研究を行った。

- 1) 異なる水温条件における湖沼の動物プランクトンの致死酸性条件と代謝速度の測定
- 2) pH 低下が湖沼の動物プランクトンの成長や個体群増殖に与える影響の評価

4. 研究成果

- 1) 異なる水温条件における湖沼の動物プランクトンの致死酸性条件と代謝速度の測定

琵琶湖における三種の優占動物プランクトンの内、カイアシ類 *Eodiaptomus japonicus* は、酸性化への耐性が最も弱かった(図1)。いずれの種類でも、酸性条件における高致死率は、低温条件より、高温条件の方が緩和されていた(図1)。これらのことから、琵琶湖に生息する動物プランクトンの致死酸性 pH は、種類によって異なることと、水温に依存することが分かる。

酸性条件における *E. japonicus* (pH 6 と pH 5.4) および Cyclopoida spp. (pH 6 と pH 5) の代謝速度は、pH 8 のそれと比べて著しく低下した(図2)。一方、酸性条件における *D. galeata* (pH 6 と pH 5) の代謝速度は、いずれの温度条件(10°C、20°C)においても、pH 7.8 のそれと比べて同程度だった(図2)。以上のことから、湖水の酸性化が動物プランクトンの代謝速度に与える影響について、種類によって異なることが分かる。

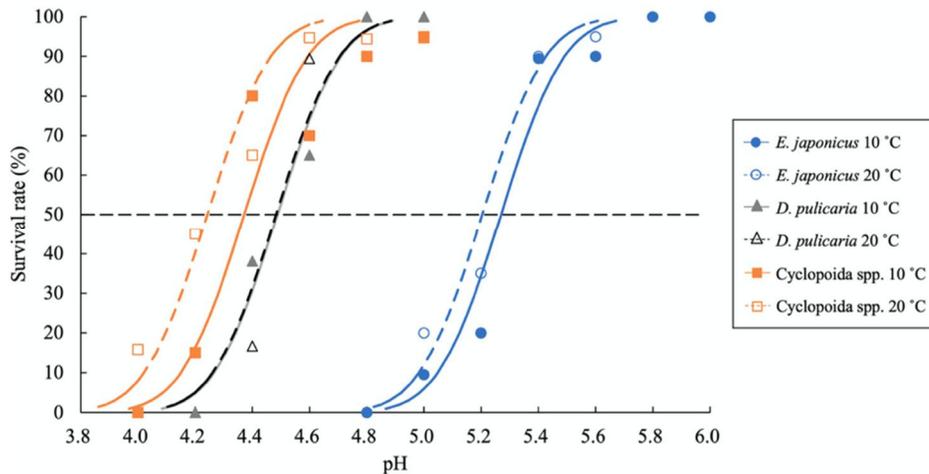


図 1. 異なる pH と温度条件における琵琶湖の優占動物プランクトン *Daphnia pulicaria*、*Eodiaptomus japonicus*、*Cyclopoida* spp. の 24 時間暴露後の生存率 (%)

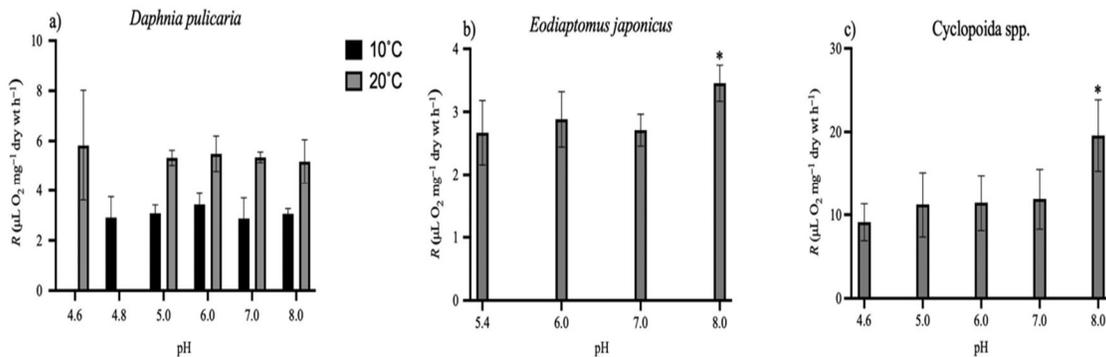


図 2. 異なる pH と温度条件における琵琶湖の優占動物プランクトンの呼吸速度 (R: $\mu\text{L O}_2 \text{ mg}^{-1} \text{ dry-wt h}^{-1}$) ; (a) *Daphnia pulicaria*、(b) *Eodiaptomus japonicus*、(c) *Cyclopoida* spp.

2) pH 低下が湖沼の動物プランクトンの成長や個体群増殖に与える影響の評価

琵琶湖の最も優占動物プランクトン *E. japonicus* の後胚発生時間は、いずれの pH 条件においてもほとんど変わらなかった (表 1)。成体までの生存率は、pH 7.8 では 46 % だったのに対して、pH 6.8 と pH 6 では著しく低下し、それぞれ 17 % と 12 % だった。ほとんどの個体はノープリウス期で死亡した (表 1)。性比は成体の生存率と同様に pH 低下に伴って著しく低下した (表 1)。結局、*E. japonicus* の体成長速度 (g) は、pH 低下の影響を受けなかった (図 3a)。*E. japonicus* の孵化率は、いずれの pH 条件においても 97 % 以上だった (表 2)。pH 低下に伴って、CS、LT と Longevity は、pH 低下の影響を受けなかったが、EPR は有意に低下し、EDT と ICD は有意に増加した (表 2) ; それらの影響を受け、結局、*E. japonicus* の個体群増加率 (r) は pH 低下に伴って著しく低下した (図 3b)。

本研究プロジェクトの結果によると、酸性条件における動物プランクトンの生理応答は種類によって異なっていたことが示唆された。湖沼の酸性化が動物プランクトンの個体群組成に影響を与え、それに伴う低次栄養段階生物の群集組成変化を介して、高次栄養段階生物への影響を及ぼす可能性がある。湖沼の動物プランクトンは海産種のそれらと比べてより強い耐酸能力を用いるが、酸性条件における動物プランクトンの遊泳行動の不活発化による摂餌効率の低下が予想される。先行研究では、栄養条件が水温より動物プランクトンの生産効率に影響を与えると知られている (Ban 1994; Liu et al. 2015)。それらのことから、湖沼酸性化が動物プランクトンの個体群増殖に強い負の影響を与える可能性がある。一方、酸性条件における動物プランクトンの高致死率は、低温条件より、高温条件の方が緩和されていた。そのことから、動物プランクトンの致死酸性 pH は水温に依存することが分かる。今後、餌条件が動物プランクトンの酸性化耐性に与える影響を明らかにすること

で、人為的な水域の酸性化と温暖化が湖沼の二次生産、ひいては水域生態系に与える影響を評価することができるようになる。

表 1. 異なる pH 条件における琵琶湖のカイアシ類 *Eodiaptomus japonicus* の各成長段階の成長時間 (DT, days)、性比 (female/male) と生存率 (%) ; M: male, F: female, CV: coefficient of variation (%), SD: stage duration (days)

Stage and sex	pH 6.0					pH 6.8					pH 7.8				
	DT	CV	SD	n	%	DT	CV	SD	n	%	DT	CV	SD	n	%
No. of eggs				78					78					65	
N1			0.9	78	99			0.9	78	99			0.9	65	100
N2	0.9	26.4	1.1	77	91	0.9	22.1	0.9	77	91	0.9	6.9	1.2	65	98
N3	2.1	18.0	1.0	70	73	1.9	33.6	1.7	70	63	2.1	33.4	1.7	64	83
N4	3.0	21.7	1.1	51	86	3.8	18.9	1.7	44	77	3.4	22.3	1.0	53	98
N5	4.4	16.7	1.3	44	55	5.1	28.2	1.9	34	71	4.8	25.3	1.6	52	83
N6	5.5	34.1	2.2	24	63	7.5	31.1	2.0	24	88	6.0	29.6	1.3	43	88
C1	9.0	47.1	2.7	15	73	10.2	31.5	2.3	21	81	7.3	31.0	1.9	38	84
C2	10.1	22.7	2.0	11	82	11.7	32.1	2.2	17	94	9.1	33.6	2.0	32	94
C3	13.0	23.5	2.0	9	100	13.9	30.1	3.0	16	94	11.6	27.5	2.2	30	100
C4	15.9	20.5	2.7	9	100	17.4	27.8	2.8	15	93	14.0	23.4	2.9	30	100
C5 M	16.7	21.4	3.0	5	100	18.5	10.3	3.0	6	100	16.6	18.0	3.0	11	100
C5 F	18.7	13.1	3.5	4	100	19.7	11.3	2.9	7	100	17.3	20.0	3.0	19	100
C6 M	19.6	17.7		5	100	21.0	7.4		6	100	19.7	13.3		11	100
C6 F	22.3	12.3		4	100	23.4	10.5		7	100	20.9	16.9		19	100
Sex ratio	0.8					1.2					1.7				
Survival (adult)	12%					17%					46%				

表 2. 異なる pH 条件における琵琶湖のカイアシ類 *Eodiaptomus japonicus* の再生産パラメータ。HS: hatching success (%), CS: clutch size (eggs clutch⁻¹), EPR: egg production rate (eggs female⁻¹ day⁻¹), EDT: embryonic development time (days), ICD: inter-clutch duration (days), LT: latency time (days), Longevity: Longevity of females (days), s.d.: standard deviation

	pH 6.0			pH 6.8			pH 7.8			P
	Mean	s.d.	n	Mean	s.d.	n	Mean	s.d.	n	
No. of pairs			3			4			6	
HS (%)	97		-	99		-	99		-	
CS	12.6	3.1	8	16.0	3.6	15	14.6	4.1	13	0.094
EPR	2.6	1.1	5	5.8	2.5	11	4.1	1.8	7	0.042
EDT	2.8	0.6	8	2.1	0.6	15	2.5	0.5	13	0.034
ICD	6.2	2.6	5	3.2	1.0	11	4.3	1.6	7	0.015
LT	3.3	2.3	5	1.2	0.5	11	2.0	1.7	7	0.247
Longevity	20.4	5.8	3	22.9	4.2	4	20.3	2.8	6	0.446

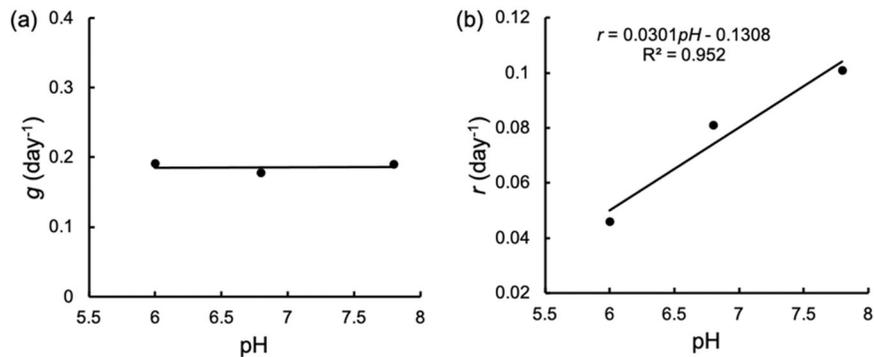


図 3. 琵琶湖のカイアシ類 *Eodiaptomus japonicus* の体成長速度 (g, day^{-1}) と pH との関係 (a) ; *E. japonicus* の個体群増加率 (r, day^{-1}) と pH との関係 (b)

<引用文献>

Amano, K., T. Fukushima, and K. Matsushige. 1997. Evaluation of the metabolic characteristics in lake water with continuously measured pH and DO data. *Journal of Japanese Society of Water Environment* **21**: 112-118.

- Ban, S. 1994. Effect of temperature and food concentration on post-embryonic development, egg production and adult body size of calanoid copepod *Eurytemora affinis*. *Journal of Plankton Research* **16**: 721-735. doi:710.1093/plankt/1016.1096.1721.
- Bonnet, D., R. P. Harris, L. Yebra, F. Guilhaumon, D. V. P. Conway, and A. G. Hirst. 2009. Temperature effects on *Calanus helgolandicus* (Copepoda: Calanoida) development time and egg production. *Journal of Plankton Research* **31**: 31-44. doi.org/10.1093/plankt/fbn1099.
- Cao, Z., F. Mu, X. Wei, and Y. Sun. 2015. Influence of CO₂-induced seawater acidification on the development and lifetime reproduction of *Tigriopus japonicus* Mori, 1938. *Journal of Natural History* **49**: 2813-2826.
- Ikeda, T., Y. Kanno, K. Ozaki, and A. Shinada. 2001. Metabolic rates of epipelagic marine copepods as a function of body mass and temperature. *Marine Biology* **139**: 587-596.
- IPCC. 2019. Technical Summary [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)].
- Liu, X., D. Beyrend, G. Dur, and S. Ban. 2015. Combined effects of temperature and food concentration on growth and reproduction of *Eodiaptomus japonicus* (Copepoda: Calanoida) from Lake Biwa (Japan). *Freshwater Biology* **60**: 2003-2018. doi:2010.1111/fwb.12626.
- Liu, X., D. Beyrend-Dur, G. Dur, and S. Ban. 2014. Effects of temperature on life history traits of *Eodiaptomus japonicus* (Copepoda: Calanoida) from Lake Biwa (Japan). *Limnology* **15**: 85-97. doi:10.1007/s10201-10013-10417-10209.
- Magnuson, J. J. and others 1997. Potential effects of climate changes on aquatic systems: Laurentian Great Lakes and Precambrian Shield Region. *Hydrological Processes* **11**: 825-871.
- Miyanaga, Y., and H. Ikeda. 1998. Acidification of surface water and its prediction in Japan. *Proceedings of the Symposium on Global Environment* **6**: 85-90. doi:10.2208/proge.2206.2285.
- 阿賀裕英. 2006. 酸性化モニタリングのための湖沼調査. *北海道環境科学研究センター所報* **33**: 51-57.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Huanan Gao, Xin Liu, Syuhei Ban	4. 巻 12
2. 論文標題 Effect of acute acidic stress on survival and metabolic activity of zooplankton from Lake Biwa, Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Inland Waters	6. 最初と最後の頁 488~498
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/20442041.2022.2058861	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Xin Liu, Yusuke Nakamoto, Gael Dur, Syuhei Ban	4. 巻 44
2. 論文標題 Mate-seeking behavior in the calanoid copepod Eodiaptomus japonicus	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Plankton Research	6. 最初と最後の頁 961~965
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/plankt/fbac052	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Huanan Gao, Xin Liu, Syuhei Ban
2. 発表標題 Effect of acidic stress on survival and metabolic activity of zooplankton collected from Lake Biwa, Japan
3. 学会等名 35th Congress of the International Society of Limnology（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 リュウキン、易容、丸尾雅啓、伴修平
2. 発表標題 イオンクロマトグラフィーを用いた正リン酸のナノモル測定と琵琶湖北湖における時空間分布
3. 学会等名 日本陸水学会第85回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Huanan Gao, Xin Liu, Syuhei Ban
2. 発表標題 Crowding effect on respiration rates of Daphnia magna at two different temperatures
3. 学会等名 2021年度日本プランクトン学会・日本ベントス学会合同大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Xin Liu, Yusuke Nakamoto, Gael Dur, Syuhei Ban
2. 発表標題 Mate-seeking behavior in the calanoid copepod Eodiaptomus japonicus from Lake Biwa, Japan
3. 学会等名 36th Congress of the International Society of Limnology (SIL2022) (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Xin Liu、高樺楠、伴修平
2. 発表標題 カイアシ類Eodiaptomus japonicusの成長に与える酸性化影響の評価
3. 学会等名 第86回日本陸水学会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------