ノート

陸水環境に及ぼす酸性雨の影響に関する研究（第３報）

石倉誠司・坪川博之・山田寿寛・塚崎嘉彦・白崎健一

Study for the Effect of Acid Rain on Water Environment (3)

Seiji ISHIKURA, Hiroyuki TSUBOKAWA, Toshihiro YAMADA, Yoshihiko TSUKASAKI, Kenichi SHIRASAKI

1　はじめに

酸性雨による陸水環境への影響を人為的汚染の少ない湖沼で調査しているが[1)~4)]、今回、夜叉ヶ池と刈込池について、水質や土壌の酸性雨に対する緩衝能およびプランクトンを調査したので報告する。

2　調査方法

2.1　調査湖沼の概要

夜叉ヶ池および刈込池の概要[1)2)5)]を表１に示すが、ともに周辺に人為的な汚染源がない標高が1,000mを越える場所に位置しており、流入や流出河川は見られない。

[夜叉ヶ池]

湖底の大部分は砂礫であるすり鉢状の湖沼で、西側には砂礫地が水際から数mの幅で広がっており、水草は見られない。

流域面積は湖沼面積の10倍程度である。

[刈込池]

湖底はほぼ平坦で泥に覆われており、湖岸周辺には水草が見られ、東側には湿地化した部分がある。

流域面積は湖沼面積の約200倍ある。

表１　調査湖沼の概要

	夜叉ヶ池	刈込池
面　　積（km²）	0.0040	0.0083
流域面積（km²）	0.042	1.7
周　　囲（m）	230	450
最大水深（m）	8	5
標　　高（m）	1,099	1,090

2.2　調査時期

[夜叉ヶ池]

水質調査：平成11年5月6日、9月29日、11月7日

土壌調査：平成11年9月29日

[刈込池]

水質調査：平成11年5月31日、7月14日、9月30日、11月5日

土壌調査：平成11年11月5日

2.3　調査地点

夜叉ヶ池および刈込池の位置を図１に、図２および３に調査地点を示した。

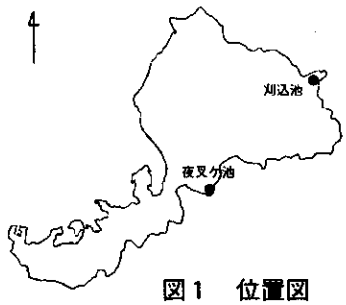

図１　位置図

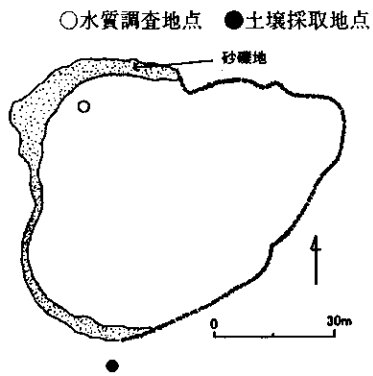

図２　調査地点（夜叉ヶ池）

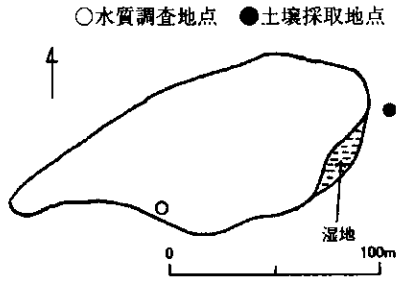

図３　調査地点（刈込池）

2.4　調査項目および調査方法

2.4.1　水質調査

pH、EC、アルカリ度、SO_4^{2-}、PO_4^{3-}、NO_3^-、NO_2^-、Cl^-、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Na^+、K^+、溶存鉄、Mn^{2+}、Al^{3+}、COD、SS、DO、クロロフィルa、クロロフィルb、クロロフィルc、カロチノイド、T-N、T-P、DOCを環境庁「陸水モニタリング調査の手引き（案）」やJIS K 0102により測定した。

なお、両湖沼とも表層水を調査したが、夜叉ヶ池では水深約1mの場所で、刈込池では湖岸から約3m離れた場所で採取した。

2.4.2　土壌調査

土壌試料はそれぞれの流域で、水際から10m程度離れた広葉樹林の中で、表面の腐食質を取り除き、表層（0～5cm）および下層（25～30cm）を採取した。

採取した土壌は風乾し2mmの篩を通した後、カラムに充填し、模擬雨水を滴下させた。流出液をフラクションコレクターで採取し、ICP発光分析装置によりAl、K、Ca等の12元素を分析した。

以下に実験条件を示すが、装置や手順は前川ら[6]が行ったものと同様である。

模擬雨水：0.001N硫酸（pH 3.0）

使用土壌：風乾土壌　8g

カ ラ ム：内径12mm、長さ約8cm

溶 出 量：1分画10mℓ（0.5mℓ/分、1分画約20分）

2.4.3　プランクトン調査

水質調査地点で採取し、以下の方法で調査した。

[動物プランクトン]

湖水20ℓをプランクトンネット（NXXX25番 40μm）を用いてろ過し、グルタルアルデヒド固定液を添加し（3V/V%）、静置濃縮後プランクトン計数板を用いて1ℓあたりの個体数を求めた。

[植物プランクトン]

採取した湖水にグルタルアルデヒド固定液を添加し（1V/V%）、静置濃縮後プランクトン計数板を用いて1mℓあたりの細胞数を求めた。

3　結果と考察

3.1　水質調査結果

調査日毎の結果を表2に、結果のうち平均値を過去の結果等とともに表3に示した。

今回の調査で得られた結果は過去と比較して大きく変動していないが、刈込池のpHは昭和61年より若干高くなっていた。

なお、表3に示すように、夜叉ヶ池および刈込池のpHやEC、アルカリ度、溶存イオンは全国の29地点（環境

表2　水質調査結果

		夜叉ヶ池				刈込池				
採 水 日		5月6日	9月29日	11月7日	平均	5月31日	7月14日	9月30日	11月5日	平均
採水地点		湖畔	湖畔	湖畔	−	湖畔	湖畔	湖畔	湖畔	−
採水時刻		13:00	12:40	14:30	−	13:30	11:05	10:50	11:40	−
全 水 深	(m)	−	−	−	−	5.7	−	−	5.7	5.7
採水水深	(m)	0.5	0.5	0.5	−	0.5	0.5	0.5	0.5	−
天　候		晴れ	晴れ	晴れ	−	晴れ	曇り	晴れ	曇り	−
気　温	(℃)	16.3	21.5	10.5	16.1	18.0	21.5	18.5	9.0	16.8
水　温	(℃)	11.0	19.9	10.0	13.6	18.9	22.0	20.0	10.1	17.8
透 明 度	(m)	−	−	−	−	4.0	−	−	4.0	4.0
pH		5.57	5.93	5.62	5.71	6.08	6.01	5.98	5.92	6.00
EC	(μS/cm)	19	14	12	15	8.8	6.9	7.1	8.4	7.8
アルカリ度	(meq/ℓ)	0.014	0.010	0.016	0.013	0.026	0.010	0.030	0.034	0.025
SO_4^{2-}	(mg/ℓ)	1.8	1.5	1.4	1.6	0.84	0.60	0.56	0.57	0.64
PO_4^{3-}	(mg/ℓ)	0.003	0.036	−	0.020	0.003	0.003	0.006	0.006	0.005
NO_3	(mg/ℓ)	0.93	0.13	0.08	0.38	0.16	0.01	0.13	0.05	0.09
NO_2	(mg/ℓ)	<0.01	<0.01	0.06	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.02
Cl	(mg/ℓ)	3.2	2.0	2.2	2.5	1.2	0.81	0.85	0.79	0.91
Ca^{2+}	(mg/ℓ)	0.41	0.33	0.29	0.34	0.40	0.36	0.34	0.46	0.39
Mg^{2+}	(mg/ℓ)	0.26	0.18	0.18	0.21	0.14	0.11	0.12	0.15	0.13
Na^{+}	(mg/ℓ)	1.8	1.3	1.2	1.4	0.80	0.55	0.55	0.55	0.61
K^{+}	(mg/ℓ)	0.26	0.41	0.31	0.33	0.21	0.15	0.30	0.38	0.26
D-Fe	(mg/ℓ)	0.03	0.14	0.08	0.08	0.01	0.12	0.09	0.18	0.10
Mn^{2+}	(mg/ℓ)	0.11	0.08	0.06	0.08	<0.01	0.02	0.03	0.05	0.03
Al^{3+}	(mg/ℓ)	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.02	<0.02	0.02	0.02
COD	(mg/ℓ)	1.7	6.3	2.5	3.5	2.9	3.8	3.8	4.2	3.7
SS	(mg/ℓ)	4	13	−	9	1	<1	<1	<1	1
DO	(mg/ℓ)	10	8.3	9.1	9.1	7.4	6.9	6.0	6.1	6.6
クロロフィルa	(μg/ℓ)	3.9	120	10	45	1.3	5.6	2.6	6.7	4.1
クロロフィルb	(μg/ℓ)	<0.1	4.1	<0.1	1.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
クロロフィルc	(μg/ℓ)	<0.1	42	1.5	15	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
全クロロフィル	(μg/ℓ)	3.9	170	12	62	1.3	5.6	2.6	6.7	4.1
カロチノイド	(μg/ℓ)	2.8	59	6.4	23	1.4	2.9	3.1	4.5	3.0
T-N	(mg/ℓ)	0.43	0.91	0.43	0.59	0.17	0.33	0.26	0.37	0.28
T-P	(mg/ℓ)	0.018	0.054	−	0.036	0.015	0.013	0.012	0.016	0.014
DOC	(mg/ℓ)	−	1.3	2.1	1.7	2.5	3.4	2.1	4.1	3.0

※刈込池の全水深および透明度は、採水とは別にボート上から測定したものである。

表3　水質調査結果（平均値）

調査項目		夜叉ヶ池（平均値）					刈込池（平均値）		全国29地点の平均値[8]
		昭和61年	平成6年	平成9年	平成10年	平成11年	昭和61年	平成11年	
pH		5.79	5.56	5.32	5.62	5.71	5.75	6.00	7.0
EC	(μS/cm)	12	18	15	13	15	8.9	7.8	66
アルカリ度	(meq/ℓ)	0.023	0.054	0.024	0.028	0.013	0.035	0.025	0.29
SO_4^{2-}	(mg/ℓ)	1.4	2.4	2.0	1.7	1.6	0.65	0.64	5.5
NO_3^-	(mg/ℓ)	0.21	0.33	0.30	0.44	0.38	<0.01	0.09	0.78
Cl	(mg/ℓ)	2.1	3.5	2.5	1.7	2.5	1.0	0.91	5.8
Ca^{2+}	(mg/ℓ)	0.52	0.63	0.33	0.30	0.34	0.55	0.39	5.2
Mg^{2+}	(mg/ℓ)	0.22	0.28	0.22	0.19	0.21	0.13	0.13	1.9
Na^+	(mg/ℓ)	1.0	2.0	1.8	1.1	1.4	0.41	0.61	4.9
K^+	(mg/ℓ)	0.26	0.48	0.29	0.28	0.33	0.14	0.26	0.71
COD	(mg/ℓ)	2.6	3.8	3.0	3.1	3.5	4.2	3.7	2.6
SS	(mg/ℓ)	1	1	−	2	9	2	1	−
DO	(mg/ℓ)	8.3	7.6	7.6	8.0	9.1	7.3	6.6	−
クロロフィルa	(μg/ℓ)	7.2	15	3.7	7.1	45	1.9	4.1	8.2
T-N	(mg/ℓ)	0.25	0.30	0.46	0.32	0.59	0.32	0.28	−
T-P	(mg/ℓ)	0.022	0.027	0.028	0.024	0.036	0.014	0.014	−

庁による第3次酸性雨対策調査[8]）の平均値より低い[4]。

[pH]

表2の調査日毎の結果から、夜叉ヶ池のpHは春先に低く夏にかけて高くなる傾向がみられた。これは、植物プランクトン活性が低く積雪の影響を受ける春先には低いpHとなり、気温の上昇により植物プランクトン活性が高まるとpHが高くなる季節変動をしているためである[2)3)]。今回の調査でも植物プランクトン量の指標となるクロロフィルとpHには相関が見られた。しかしながら、刈込池にはこのような相関は見られず、pHはほぼ一定の値であった。

[EC・溶存イオン]

両湖沼のECや溶存イオンを比較すると、Ca^{2+}やAl^{3+}を除いて夜叉ヶ池で高い値が得られた。山田ら[7]が昭和61年6～9月に両湖沼で行った雨水調査によれば、SO_4^{2-}、NO_3^-、Cl^-、Na^+、K^+、Ca^{2+}の降下量はいずれも夜叉ヶ池のほうが1.5～2倍程度高い値を示した。この要因の一つとして、位置的に夜叉ヶ池のほうが海に近いため海塩の影響を受けたことが考えられる。この降下する成分や池の形態、流域の状況の違い等が両湖沼のECや溶存イオンに影響を与えていると思われる。

[アルカリ度・Ca・DOC]

今回の調査では、刈込池のアルカリ度やCa^{2+}、DOCは夜叉ヶ池より高い値が得られた。この原因や、このことと酸性雨に対する緩衝能との関連を今後検討していきたい。

3.2　土壌調査結果

分析した元素のうち、Ca、K、Alについての濃度変化を図4～7に示す。

全ての土壌でCaの濃度がピークを過ぎたころからAlの濃度が高くなっているが、Alの濃度が高くなるまでの時間は、夜叉ヶ池の下層が最も早く、刈込池の表層が最も遅い結果となった。このAlの濃度が高くなる時間から、夜叉ヶ池周辺土壌の酸性雨に対する緩衝能は、刈込池と比較すると低いと考えられる。

なお、全ての土壌で第1および第2フラクションに全ての元素が高い濃度で溶出していたが、これは土壌の特性[9]によるものかどうかについて実験方法も含めて今後検討していきたい。

3.3　プランクトン調査結果

動物および植物プランクトンの結果を表4～5に示す。

表2の水質調査結果が示すように夜叉ヶ池で、9月29日にクロロフィルaが120μg/ℓと非常に高くなったが、この原因

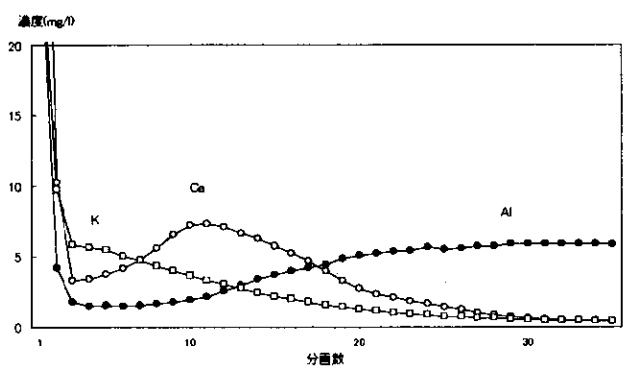

図4　夜叉ヶ池周辺土壌の溶出曲線（表層）

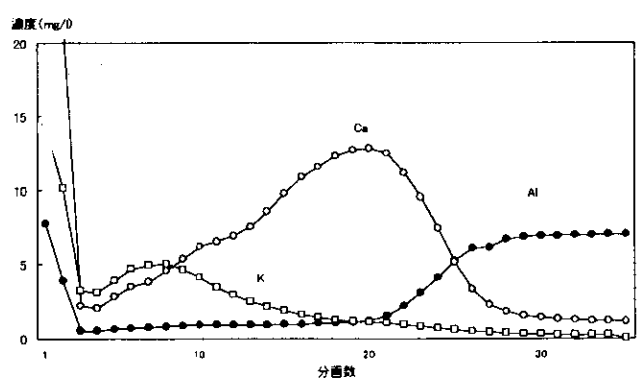

図5　刈込池周辺土壌の溶出曲線（表層）

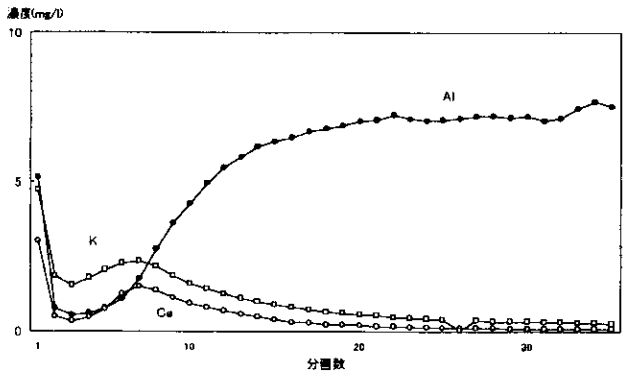

図6　夜叉ヶ池周辺土壌の溶出曲線（下層）

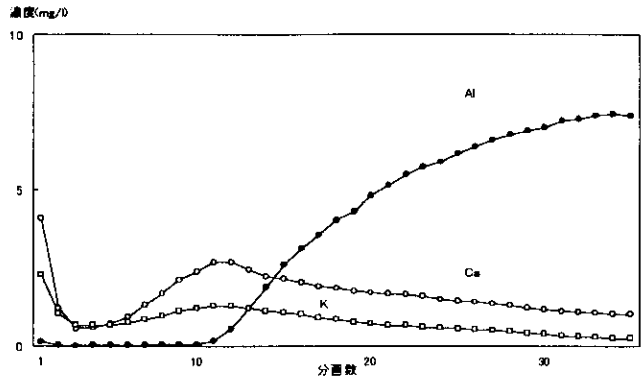

図7　刈込池周辺土壌の溶出曲線（下層）

表4　動物プランクトン調査結果

単位：個体数/ℓ

Class	Species	夜叉ヶ池		刈込池			
		5月6日	9月29日	5月31日	7月14日	9月30日	11月5日
EUROTATOREA	*Keratella valga*			<1			
	Notholca sp.	1					
	Monostyla sp.				1		
	Trichocerca sp.					<1	
	Testudinella sp.				5	1	
CRUSTACEA	Nauplius, Copepodid	24		44	62	46	73
	Calanoida		50				
	Cyclopoida			1	<1	3	16
	Daphnia longispina				5	1	78
	Chydoridae				<1		4
TARDIGRADA	*Dactylobiotus* sp.	<1					
Others			2000				

表5　植物プランクトン調査結果

単位：cells/mℓ

Class	Species	夜叉ヶ池			刈込池			
		5月6日	9月29日	11月7日	5月31日	7月14日	9月30日	11月5日
CYANOPHYCEAE	*Chroococcus* sp.				210			
	Phormidium sp.	720						
BACILLARIOPHYCEAE	*Cyclotella* sp.	140						
	Melosira varians						430	
	Synedra sp.						18	
CHRYSOPHYCEAE	*Uroglena americana*					720		
	Mallomonas sp						230	120
XANTHOPHYCEAE	*Botryococcus braunii*	4600	4500	13000			180	
DINOPHYCEAE	*Peridinium* sp.						18	
	Ceratium hirundinella		630	120				
CRYPTOPHYCEAE	*Cryptomonas* sp.	1900			54			
CHLOROPHYCEAE	*Sphaerocystis* sp.					640	1000	
	Oocystis sp.				90		72	72
	Ankistrodesmus falcatus	18						
Others			160	210	450	320	190	120

は植物プランクトンの1種である渦鞭毛藻DINOPHYCEAEの *Ceratium hirundinella* によるものと考えられる。この渦鞭毛藻は、第1優占種である *Botryococcus braunii* に比べて大きな細胞を持っており、クロロフィル量に大きな影響を与える。平成10年の調査[4]では、*Ceratium hirundinella* の発生は非常に少なく、*Botryococcus braunii* がクロロフィル量に大きな影響を与えていた。

なお、植物プランクトンの異常増殖によりアオコが発生する三方湖における平成11年度の常時監視結果によれば、三方湖東部でのクロロフィルaの最高値は46μg/ℓである。

両湖沼のプランクトン等の生物についての調査は少ないため、今後データを蓄積していきたい。

3.4　今後の調査

今後は、データの蓄積が少ない刈込池での水質モニタリングを継続するとともに、流域の状況把握のための調

査やプランクトン等の生物調査を行い、両湖沼を種々の面から比較検討することにより、酸性雨による陸水環境への影響について調査していきたい。

4 まとめ

酸性雨による陸水環境への影響を把握するため、人為的汚染の少ない夜叉ヶ池および刈込池で水質調査、土壌調査およびプランクトン調査を行い、以下の結果を得た。

(1) 水質調査から両湖沼とも以前の結果と大きな変動は見られなかったが、刈込池のpHは昭和61年と比べて若干高かった。

また、溶存イオンの濃度は全般的に夜叉ヶ池が高かった。

(2) 夜叉ヶ池のpHは植物プランクトンの影響を受け、春先低く、夏場に高い季節変動をするが、刈込池ではこの現象はみられなかった。

(3) 酸性雨に対する土壌の緩衝能は、模擬雨水による溶出試験から、刈込池周辺土壌のほうが夜叉ヶ池より高かった。

参考文献

1) 高田敏夫ほか：陸水環境に及ぼす酸性雨の影響に関する研究（第２報），福井県公害センター年報, 26, pp.182-190, 1986.
2) 坊栄二ほか：夜叉ヶ池における酸性雨影響調査について，福井県環境科学センター年報, 24, pp.112-116, 1994.
3) 白崎健一ほか：夜叉ヶ池における酸性雨影響調査について（第２報），福井県環境科学センター年報, 27, pp.81-83, 1997.
4) 石倉誠司ほか：夜叉ヶ池における酸性雨影響調査について（第３報），福井県環境科学センター年報, 28, pp.108-110, 1998.
5) 国土地理院1/25,000地形図（平成3年9月1日発行）
6) 前川勉ほか：酸性雨の土壌に及ぼす影響の評価方法について，福井県環境センター年報, 20, pp.102-116, 1990.
7) 山田寿寛ほか：雨水のバックグランドについて，福井県公害センター年報, 16, 196-198, 1986.
8) 環境庁 (財)日本環境衛生センター酸性雨研究センター：第3次酸性雨対策調査データ集（陸水系調査分冊）
9) 前川勉ほか：福井県における酸性雨と生態系の実態について（第２報），福井県環境センター年報, 21, pp.33-40, 1991.