

平成12年度森林地帯における酸性成分の乾性沈着に関する調査研究

児玉 仁 ・ 大畑 博正 ・ 高嶋 司*

要 旨

世界遺産として登録されている白神山地の環境保全を目的とし、生態系に悪影響を及ぼすと考えられている大気中の乾性沈着物質をフィルターパック（4段ろ紙）法により採取し、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 NH_4^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ の8イオン種についてイオンクロマトグラフで定量した。この結果、乾性沈着成分の総量は、白神山地の山麓に位置する八森町で期間平均は 244n-mol/m^3 と、市街地である秋田市の 553n-mol/m^3 に対し半分以下の濃度であった。また、捕集形態（粒子状、ガス状）別の各イオン種濃度についても八森町は秋田市の概ね半分以下の大気中濃度であった。

1. はじめに

森林の枯死や湖沼の酸性化あるいは建造物の腐食等、酸性雨による環境破壊は、その現象が確認されてからでは、その防止が非常に困難であるといわれている。世界遺産条約の自然遺産に登録されたブナの原生林で知られる白神山地をはじめ、広大な森林地帯を有する本県は、大陸気団の影響を受けやすい地理的位置にあり、酸性雨による森林生態系への影響が懸念される。

大気中の乾性成分（粒子、エアロゾル、ガス）は、ウォッシュアウトにより降水中に取り込まれ、酸性雨に影響を与えるだけでなく、森林地帯では直接、樹木や地表面に付着・吸着することによって生態系に悪影響を及ぼすことも懸念されている。このため、森林地帯における乾性沈着成分の環境実態を明らかにするため酸性雨調査と合わせて4段ろ紙法による乾性沈着調査を実施した。

本調査では、汚染物質の発生源と考えられる市街地での乾性沈着成分の通年データを収集し、森林地帯での調査データの比較により評価を行った。

本調査の4段ろ紙採取法は、アーティファクト（一旦捕集された粒子状物質が、そこを通過するガス状物質と化学反応することによりガス体として2次捕集される）が避けられないなどの幾つかの諸問題¹⁾を抱えているが、これを踏まえた上で解析を試みた。なお、本報告では実施2年目に当たる平成12年度の結果について報告する。

2. 調査方法

2.1 調査地点

調査地点は、森林地帯として八森ぶなっこランド敷地内（八森町）、比較対照地点として秋田県環境センター八橋分室敷地内（秋田市）とした。八森ぶなっこランドは白神山地の山麓にあり、海岸から約3kmの公園に位置し、周囲は農地が大部分で民家・工場は無い。西側の約2km離れた所に国道101号線（交通量；3,337台/日²⁾）がある。一方、秋田県環境センター八橋分室は、海岸からの距離が約5kmの所に位置し、周囲には工場・事業所が多く住宅地も隣接している。当センターは臨海バイパス（交通量；44,870台/日²⁾）に面している。

2.2 調査期間および試料の採取頻度

八森町では、平成12年6月、8月、11月、平成13年2月の各1ヶ月間を通じて試料を採取した。また、秋田市では、平成12年4月～13年3月の期間を1ヶ月間の区切りとし通年で試料を採取した。乾性成分の捕集サイクルは2週間単位（1ヶ月が5週の場合は最終週を1週間とした）を基本とした。

2.3 採取方法

乾性成分の捕集装置を図1に示した。NILE社製フィルターホルダー（上段よりF0、F1、F2、F3）には捕集材としてろ紙を装着し、F2およびF3のろ紙については前処理として、吸収液による超音波洗

* 現大曲仙北健康福祉センター

浄（5分間、2回）を行った。これらのろ紙は密封容器で冷蔵庫保管し、調査開始時に大型のろ紙にはさみ余分な吸収液を除いた後、使用した。表1にNILEフィルターホルダーの構成および捕集物質について示した。

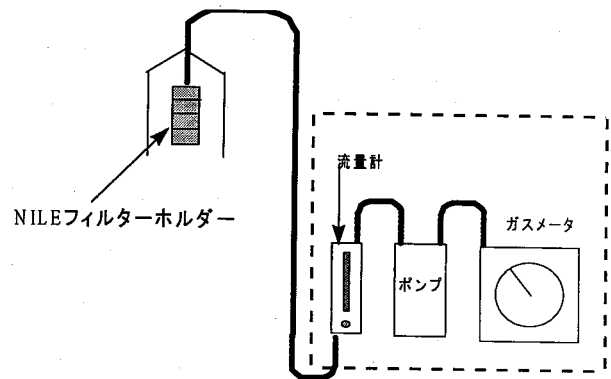


図1 捕集装置

表1 NILEフィルターホルダーの構成等

ステージ	ろ紙の種類	吸収液	捕集物性状	捕集対象化合物	測定項目
F0	PTFE; (ADVANTEC 社; 孔径 0.8 μ m, 47 Φ)	—	粒子状	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Cl ⁻ NH ₄ ⁺ , Na ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Cl ⁻ NH ₄ ⁺ , Na ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺
F1	ポリアミド; (PALL 社製 ULTPOR N66; 孔径 0.45 μ m, 47 Φ)	—	ガス状 (ミストを含む)	SO ₂ , HNO ₃ , HCl, NH ₃	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , NH ₄ ⁺
F2	セルロース; (ADVANTEC 社; NO.51A, 47 Φ)	6%-K ₂ CO ₃ +2%グリセリン水溶液	ガス状	SO ₂ , NO _x , HCl	SO ₄ ²⁻ , (NO ₃) ⁻ , Cl ⁻
F3	"	5%-りん酸 +2%グリセリン水溶液	"	NH ₃	NH ₄ ⁺

2.4 分析方法

試料採取後のろ紙は4つに切り、内容量50 mlのキャップ付きポリプロピレン容器に入れ、抽出溶媒20ml (F0, F1, F3は水, F2は0.3% H₂O₂水溶液)を加え、振とう抽出した。F0, F2, F3の各抽出液は孔径0.45 μ mメンブランフィルターでろ過後の溶液を試料とし、F1は抽出液をそのまま試料に供した。乾性成分の各抽出試料は、イオンクロマトグラフ (DIONEX社製 IC-100)により表1の測定項目に示す8イオン種について定量を行った。

2.5 濃度の算出

大気吸引量は捕集期間の平均気温³⁾により20℃に換算した。各ステージにおける成分量(n-mol)を大気吸引量(at20℃)で除し、粒子状成分(SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻, NH₄⁺, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺)はF0からの値を、ガス状成分(SO₂, HCl, HNO₃, NH₃)では、SO₂およびHClはF1とF2の合計量を、HNO₃はF1の量を、NH₃はF1とF3の合計量を各々の大気中濃度(n-mol/m³)とした。F2におけるNO₃⁻はNO_xに由来し、

これらは抽出溶媒のH₂O₂に酸化されNO₃⁻としてイオンクロマトグラフで検出される。しかし、炭酸カリウム含浸ろ紙ではNO₂の一部しか捕捉されず、定量性がないことが指摘されている¹⁾ため、()付きとし、特に断りのない限り成分量に含めないことにした。また、粒子状成分およびガス状成分についてもイオンクロマトグラフでの定量形態であるイオン種(SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻, NH₄⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺)として表記する。

3. 調査結果および考察

3.1 大気中の乾性成分濃度

3.1.1 乾性成分の総量

粒子状濃度(n-mol/m³)とガス状成分濃度(n-mol/m³)の和を「総量」とし、表2に乾性成分濃度の総量を示した。秋田市では、総量の最高は12月の855、最低は5月の409、12ヶ月の平均は553だった。八森町では、5月376、6月200、8月177、2月224で、秋田市の同月と比較して約4~6割の濃度だった。また、八森町の4ヶ月間の平均は244であった。

表2 乾性成分濃度調査の結果

単位； n-mol/m³

調査地点 観測月	F0 (粒子状)									F1~F3 (ガス状)				合計 (F0 ~ F3)										
	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	合計	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	合計	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	合計	
秋田市	4月	47	34	70	58	76	7.0	13	9.4	43	7.5	30	106	90	41	99	164	76	7.0	13	9.4	500		
	5月	55	19	10	73	10	5.2	6.4	4.1	39	21	23	144	94	39	33	217	10	5.2	6.4	4.1	409		
	6月	76	25	8.5	118	31	7.8	7.2	3.9	37	25	40	228	113	50	49	346	31	7.8	7.2	3.9	607		
	7月	72	28	19	99	53	6.1	11	6.5	30	13	44	329	102	40	63	428	53	6.1	11	6.5	709		
	8月	41	17	8.1	42	31	4.7	10	3.9	50	20	43	258	91	36	51	300	31	4.7	10	3.9	528		
	9月	55	13	23	70	43	4.5	7.7	5.1	69	10	31	170	124	23	53	240	43	4.5	7.7	5.1	500		
	10月	29	13	43	29	57	5.6	7.8	6.3	58	6.1	25	154	87	19	68	182	57	5.6	7.8	6.3	433		
	11月	38	18	61	59	63	6.0	11	7.0	69	3.0	13	160	107	21	74	219	63	6.0	11	7.0	507		
	12月	63	40	153	106	131	8.9	13	13	146	6.3	29	146	209	47	182	252	131	8.9	13	13	855		
	1月	35	17	81	58	72	3.9	7.1	6.0	81	2.9	11	68	117	20	91	126	72	3.9	7.1	6.0	442		
	2月	49	21	93	69	80	6.9	15	6.7	80	2.6	10	108	129	24	103	176	80	6.9	15	6.7	540		
	3月	53	28	85	76	83	8.5	15	7.2	79	6.8	25	142	132	35	110	219	83	8.5	15	7.2	609		
八森町	4月																							
	5月																							
	6月	61	10	2.0	94	20	6.3	0.5	1.1	10	13	26	132	71	23	28	227	20	6.3	0.5	1.1	376		
	7月																							
	8月	30	5.1	4.1	36	23	6.3	1.7	1.7	7.3	6.7	15	62	38	12	20	98	23	6.3	1.7	1.7	200		
	9月																							
	10月																							
	11月	26	7.9	28	33	40	4.0	4.3	4.4	6.1	1.2	7.0	16	32	9.2	35	49	40	4.0	4.3	4.4	177		
12月																								
1月																								
2月	32	7.2	35	29	48	3.7	2.0	4.0	17	4.5	25	16	49	12	60	45	48	3.7	2.0	4.0	224			
3月																								

3.1.2 乾性成分のイオン種別濃度

表3に乾性成分濃度の平均(秋田市12ヶ月、八森町4ヶ月平均)を示した。

SO₄²⁻は、八森町では粒子状で、秋田市ではガス状で捕集される量が多く、NH₄⁺は両地点ともガス状で捕集される量が多かった。Cl⁻は、秋田市では粒子状のものが多く、八森町では粒子状とガス状が同程度で捕集された。NO₃⁻については、前述したようにNO_xはF2ろ紙では定量性がないとされているが、少なくとも、これ以上の量が窒素酸化物として大気中に存在していると考えられるので、F2ろ紙からのNO₃量を含めた場合の値を参考値として()付きで表記してある。NO₃⁻に関しては秋田市、八森町でも硝酸体としてはガス状より粒子状で捕集される割合が大きい、硝酸の前駆物質である窒素酸化物としてみればガス状で存在している割合が大きいと考えられる。NO_xの扱いについては今後の課題である。

表3 乾性成分濃度の平均 単位； n-mol/m³

		SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
F0	秋田市	51	23	54	71	61	6.3	10	6.6
	八森町	38	7.4	17	48	32	5.1	2.1	2.8
F1~F3	秋田市	65	10(33)	27	168	-	-	-	-
	八森町	10	6.4(12)	18	57	-	-	-	-
F0~F3	秋田市	116	33(56)	81	239	61	6.3	10	6.6
	八森町	48	14(19)	35	105	32	5.1	2.1	2.8

()内の値はF2で定量されたNO₃を含めた場合

成分濃度は、八森町が全ての成分で秋田市より低く、K⁺を除き秋田市のほぼ半分またはそれ以下だった。表4は乾性成分総量に対する成分の平均組成比率を示したものである。両地点間の成分比率に大きな相違は無いが、八森町でNa⁺が秋田市より高い他、K⁺とCa²⁺で若干の差異が見られた。秋田市でのCa²⁺

濃度は10 n-mol/m³と八森町に比べ高く、道路粉塵の影響によるものと推測される。K⁺は八森町で秋田市の2倍の比率を示したが、濃度的には両地点に差がみられなかった。また、両地点ともSO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻、NH₄⁺、Na⁺の5イオン化合物で全体の95%以上を占めている。

表4 乾性成分総量および組成比率

	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
秋田市	濃度(n-mol/m ³)	116	33	81	239	61	6.3	10
	比率(%)	(21.0)	(6.0)	(14.7)	(43.2)	(11.0)	(1.8)	(1.2)
八森町	濃度(n-mol/m ³)	48	14	36	105	33	5.1	2.8
	比率(%)	(19.5)	(5.7)	(14.6)	(42.7)	(13.4)	(2.1)	(0.9)

(秋田市12ヶ月、八森町4ヶ月平均)

秋田市のイオン種ごとの総量の推移を図2(アニオン)と図3(カチオン)に示した。特にNH₄⁺の濃度変化が特徴的で、夏期に高く冬期に低くなる傾向が顕著で、他のイオン種と異なった変動を示している。K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺については各月とも低濃度で推移した。

八森町の月毎の総量を表5に示した。この結果を、前述の秋田市の結果と比較してみると、NH₄⁺は6月に227 n-mol/m³と最大を示し、秋田市と同様夏期に高濃度となる傾向がある。SO₄²⁻、NO₃⁻は月により多少の変動はあるが、最大と最小で約2倍の差となっている。SO₄²⁻は秋田市では12月にピークがあるが、概ね2倍程度の濃度範囲で推移しており、両地点において大きな相違は無いと思われる。

表5 八森町の乾性成分濃度 単位； n-mol/m³

		SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
八森町	6月	71	23	28	227	20	6.3	0.5	1.1
	8月	38	12	20	98	23	6.3	1.7	1.7
	11月	32	9.2	35	49	40	4.0	4.3	4.4
	2月	49	12	60	45	48	3.7	2.0	4.0

図2 秋田市の乾性成分濃度 (アニオン)

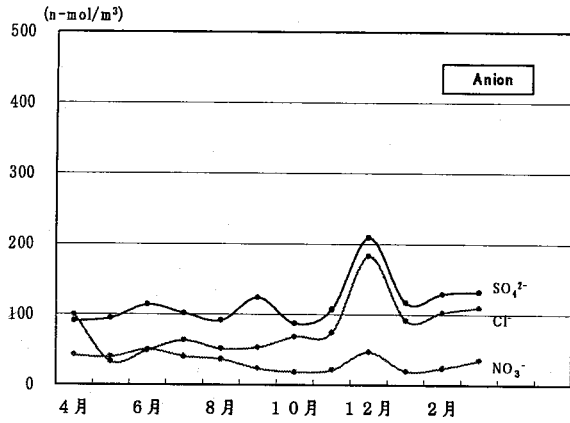
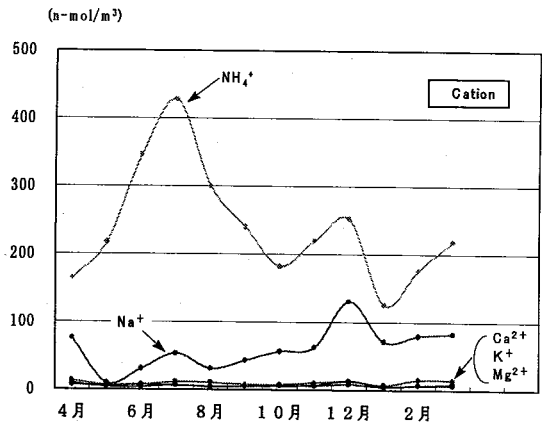


図3 秋田市の乾性成分濃度 (カチオン)



3.2 降水中の成分濃度

降雨については、pHの平均値は、八森町で4.45、秋田市で4.77と差があった。大気中の乾性成分は、ウオッシュアウトにより降雨に取り込まれることに

より、大気中濃度が低下すると考えられる。図4および図5に秋田市の月別、イオン種別の降水成分濃度と降水量の変動パターン³⁾を示した。

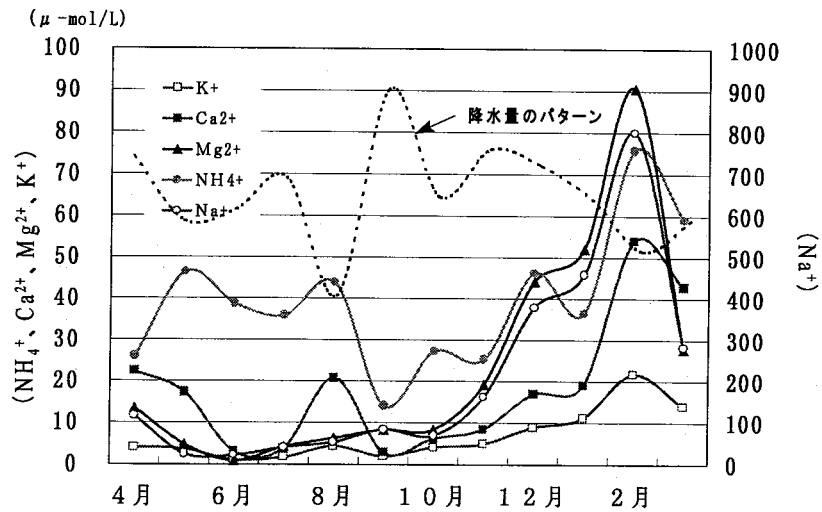


図4 秋田市の降水成分濃度 (カチオン)

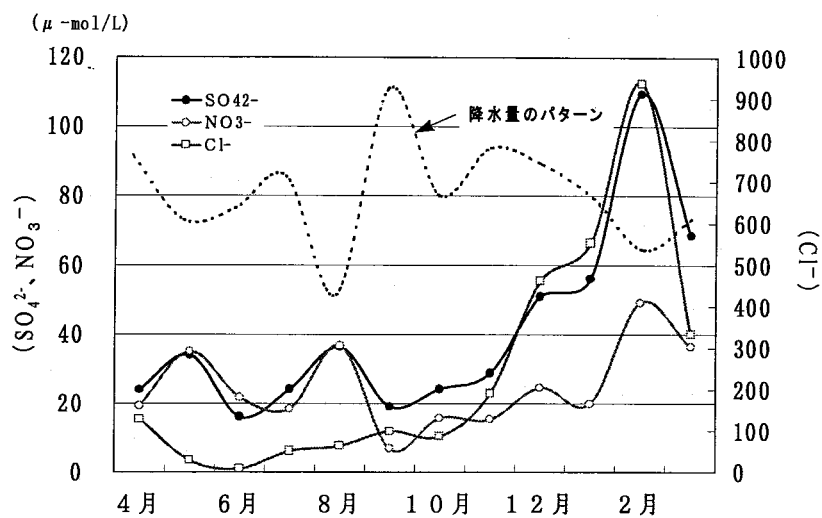


図5 秋田市の降水成分濃度 (アニオン)

各イオン成分濃度と降水量の変化を比較してみると11月、12月を境にし、傾向が異なっているように思われる。夏期には、降水量が多くなると SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} の濃度が減少する傾向が見られるが、 Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} は降水量の増減に関係なく比較的濃度で推移している。一方、冬期には、各成分とも急激に濃度が高くなり、各成分間の増減は良く類似したパターンとなっている。

海水のpHは約8.3⁴⁾であり、海水そのものは酸性雨を中和する方向に働くと考えられる。 Na^+ を指標とし海水の組成比から各イオン種の非海塩性成分量を算出した結果を表6に示した。非海塩性成分中に占める各成分の割合を八森町と秋田市で比較したところ、八森町が降雨の酸性化に寄与する非海塩性の硫酸イオン(nss-SO_4^{2-})と硝酸イオン(NO_3^-)の割合が秋田市より高く、アルカリ性化に寄与する非海塩性のカルシウムイオン(nss-Ca^{2+})とアンモニウムイオン(NH_4^+)の割合は低い傾向にあった。

表6 降水中の非海塩性成分 単位； $\mu\text{-mol/L}$

	nss-SO_4^{2-}	NO_3^-	nss-Cl^-	Na^+	nss-K^+	nss-Ca^{2+}	nss-Mg^{2+}	NH_4^+	Total
秋田市	平均 24.0 比率(%) (25.0)	20.5 (21.4)	4.90 (5.1)	-	1.85 (1.9)	10.0 (10.5)	0.35 (0.4)	34 (35.6)	96 (100)
八森町	平均 24.0 比率(%) (28.5)	27.7 (32.9)	2.54 (3.0)	-	1.52 (1.8)	3.84 (4.6)	0 (0.0)	25 (29.2)	84 (100)

(秋田市12ヶ月、八森町4ヶ月平均)

3.3 まとめ

- (1) 大気中の乾性沈着成分総量は、八森町で平均244 n-mol/m^3 、秋田市553 n-mol/m^3 と1/2の濃度であった。各成分については、ガス体で捕

集される量と粒子状で捕集される量には両地点間に相違はあったが、全成分量に対する組成比は類似していた。 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 NH_4^+ 、 Na^+ の5イオン種で全体の95%以上を占め、 SO_4^{2-} は八森町では粒子状で、秋田市ではガス状で捕集される量が多かった。 NH_4^+ は、両地点ともガス状で捕集される量が多く、夏期に高濃度になる傾向が顕著であった。秋田市では NH_4^+ に比べて SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 Na^+ は季節による変動が小さかった。

- (2) 雨水については、降水量で重み付けした平均pHは、八森町4.45、秋田市4.77と差が認められたが、大気中の乾性成分量との関係は明らかでない。

参考文献

- 1) 玉置元則、平木隆年、藍川昌秀、西川嘉範、田口圭介、松本光弘：乾性沈着モニタリングにおける4段階紙法の技術的評価、大気環境学会誌、2001、36(5)、308-317
- 2) 秋田県建設交通部道路建設課：平成11年度全国道路交通情勢調査(道路交通センサス)一般交通量調査表
- 3) 気象庁：平成12年気象庁月報(CD-ROM版)
- 4) 化学大事典編集委員会編：化学大事典、共立出版、2,250、(1971)

人工湖（山瀬ダム）の水質汚濁機構の解明に関する調査研究（平成10～12年度）

珍田尚俊 ・ 渡辺 寿* ・ 加藤 潤**

1. はじめに

秋田県では人工湖8ヶ所について、環境基準の類型（AA及びA）指定をしているが、半数の4ヶ所について環境基準を達成できない状態にある。県内の人工湖が環境基準を達成できない原因を解明するため、平成4～9年の約6年間にわたり、環境基準未達成の萩形ダム（昭和41年建設）と皆瀬ダム（昭和39年建設）及び、築後間もない山瀬ダム（平成3年建設）について調査を実施した¹⁾。その結果、萩形及び皆瀬ダムでは山瀬ダムと比較して、ダム湖内及び流入河川のCOD、T-N、T-P濃度等が高めであること、また、夏から秋にかけて下層でDOが著しく減少し、底質からのT-N、T-Pの溶出が増大することから、植物プランクトンが増殖しやすく、COD濃度が高くなることが推察された。

今回は、水質汚濁が比較的進んでいない山瀬ダム及びその周辺河川の水質等の変化について継続的に調査し、山瀬ダムの水質の特徴及び水質汚濁の進行状況について考察した。

2. 山瀬ダムの概要

山瀬ダムは、図1に示したとおり、米代川水系岩瀬川の北秋田郡田代町岩瀬に、中央コア型ロックフィルダムとして、平成3年に建設された。

山瀬ダムの流域面積は67.2 Km²、総貯水量は1,290万 m³、堤高62 mであり、岩瀬川流域の洪水被害を防止し、下流既得用水の補給等流水の正常な機能を維持し、さらに田代町及び能代市に対し水道用水として、かつ工業用水として東北電力(株)能代火力発電所に対して取水を可能にした。また、山瀬発電所を建設し、最大出力2,100 KWの発電を行うダムである²⁾。

3. 調査方法

3.1 調査期間

平成10～12年の5月(12年は6月)、7月、9月、10月の年4回(底質は10～12年の10月の年1回)

3.2 調査地点(図2)

- ・湖内2地点(表層～下層(5mおきに実施))
 - A地点 水質:5～7層
 - B地点 水質:4～6層
- ・流入河川3地点(岩瀬川, 繫ノ沢, 内町沢)
- ・平成11年からは岩瀬川の上流部3地点を追加(赤倉鉦山旧坑口, 赤倉沢橋, 岩瀬川上流)
- ・底質は湖内(A, B)2地点及び流入河川3地点

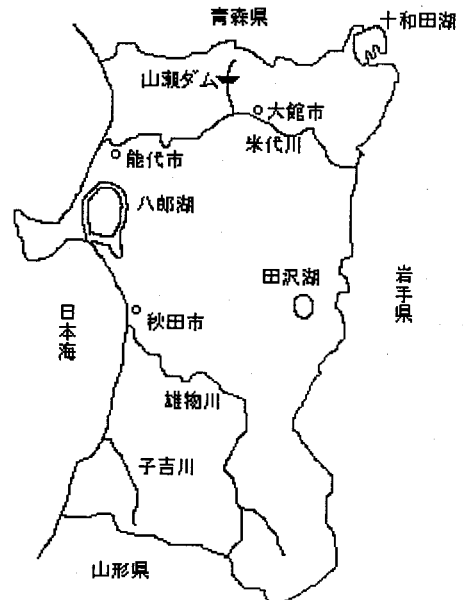


図1 山瀬ダム位置図

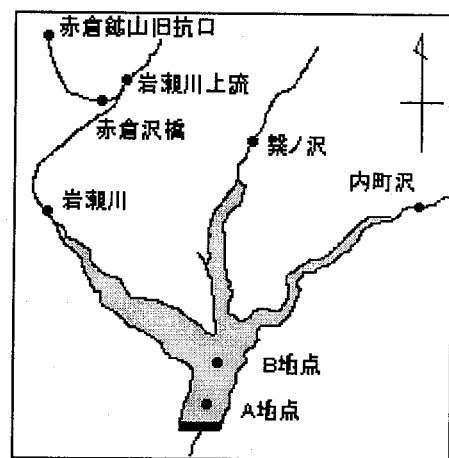


図2 山瀬ダム調査地点図

* 現秋田県水産振興センター

** 現秋田県北部流域下水道事務所

3.3 調査項目及び分析方法

分析項目及び方法については表1に示す。(底質の全量の分析方法は、CODが底質調査法による過マンガン酸カリウム法、T-Nがケルダール・中和滴定法、

他の項目は硝酸-過塩素酸分解法による前処理を行った後、水質分析と同じ方法で行った。また、底質の溶出の分析方法は、底質3%で4時間振とうした水溶液を試料とし、水質分析と同じ方法で行った。)

表1 水質・底質の分析方法

項目	分析方法	水質	底質(全量)	底質(溶出)
電気伝導度	JIS K0102 13	○		
透明度	海洋観測指針 4.1	○		
pH	JIS K0102 12.1	○		
DO	JIS K0102 32.1	○		
COD	JIS K0102 17	○	○	○
NH ₄ -N	JIS K0102 42.2	○		○
NO ₂ -N	JIS K0102 43.1.1	○		
NO ₃ -N	JIS K0102 43.2.3	○		
T-N	JIS K0102 45.2	○	○	
PO ₄ -P	JIS K0102 46.1.1	○		○
T-P	JIS K0102 46.3.1	○	○	
クロロフィルa	海洋観測指針 9.6.2	○		
SS	環境庁告示 付表 9	○		
TOC	JIS K0102 22.1	○		
Cl ⁻	JIS K0102 35.3	○		○
SO ₄ ²⁻	JIS K0102 41.3	○		○
Na ⁺	JIS K0102 48.2	○	○	○
K ⁺	JIS K0102 49.2	○	○	○
Ca ²⁺	JIS K0102 50.2	○	○	○
Mg ²⁺	JIS K0102 51.2	○	○	○
T-Fe	JIS K0102 57.2	○	○	○
Mn	JIS K0102 56.2	○	○	○
Al	JIS K0102 58.2	○		

4. 調査結果

4.1 水温 (図3)

ダムサイトA地点表層の平成10年～12年の水温は13.3～20.9℃の範囲で、B地点表層の水温は11.5～21.7℃の範囲にあり、B地点の変動が流入河川の影響により若干大きくなっている。最下層においては、A、B両地点とも大部分が7℃前後で、季節による変化がみとめられない。なお、7月～9月にかけては表層の水温上昇に伴い、表層と最下層との温度差が10℃を超えている。また、B地点と流入3河川の水温を比較してみると、各月とも表層から5m層に流入していると思われる。

4.2 pH (図4)

平成10年～12年のpHは、ダムサイトA地点では6.2～7.0の範囲で、B地点のpHは6.1～6.9の範囲にあり、季節による変化は、A、B両地点とも平成12年の表層と5m層を除いてほぼ一定で推移し大きな変動はみられない。流入河川についてみると、岩瀬川、繫ノ沢及び内町沢のpHの年平均値は、それぞれ4.8～6.2、6.7～6.9、7.0～7.5の範囲にあり、岩瀬川が酸性になっている。この岩瀬川の影響によりダム湖自体がやや酸性を示す傾向がみられる。

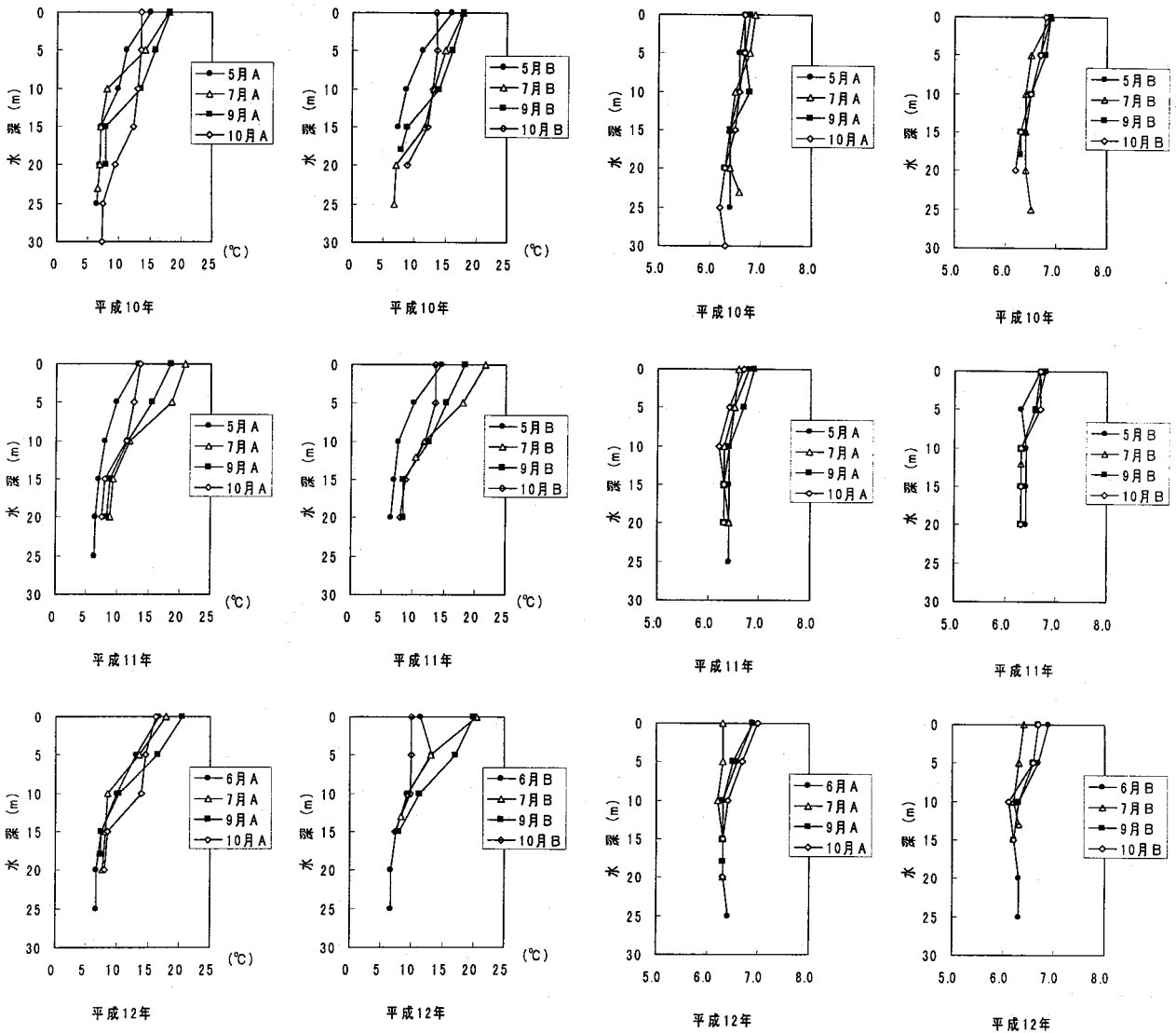


図3 山瀬ダムの水温分布

図4 山瀬ダムのpH分布

4.3 溶存酸素量(DO) (図5)

ダムサイト A 地点表層の平成 10 年～ 12 年の DO は、4.1～12 mg/L の範囲で、B 地点の DO は 3.4～12 mg/L の範囲にあり、年平均値は A 地点では 9.5～10 mg/L、B 地点では 8.9～9.9 mg/L とやや A 地点が高い傾向にある。

また、A、B 両地点とも 9 月～10 月にかけて 15 m 層以深で DO の減少傾向がみられるが、これ以外の時期・地点とも DO の著しい減少はみられない。

4.4 浮遊物質(SS) (図6)

ダムサイト A 地点の平成 10 年～12 年の SS は <1.0～53 mg/L の範囲で、B 地点では 1.0～13

mg/L の範囲にあり、年平均値は A 地点では 1.8～6.6 mg/L、B 地点では 1.9～4.8 mg/L の範囲で、平成 10 年が最も高く年々減少している。特に平成 10 年 7 月の A 地点の最下層で 53 mg/L と非常に高くなっているが、これは下層部の泥の一部が混入したものと考えられ、この地点のデータを除くと A 地点は <1.0～11 mg/L の範囲で年平均値は 1.8～4.6 mg/L となり、A、B 両地点での差はほとんどみられなくなる。

流入河川についてみると、岩瀬川、繫ノ沢及び内町沢の SS の年平均値は、それぞれ 3 mg/L、<1～3 mg/L、<1～1 mg/L の範囲にあり、岩瀬川が最も高くなっている。

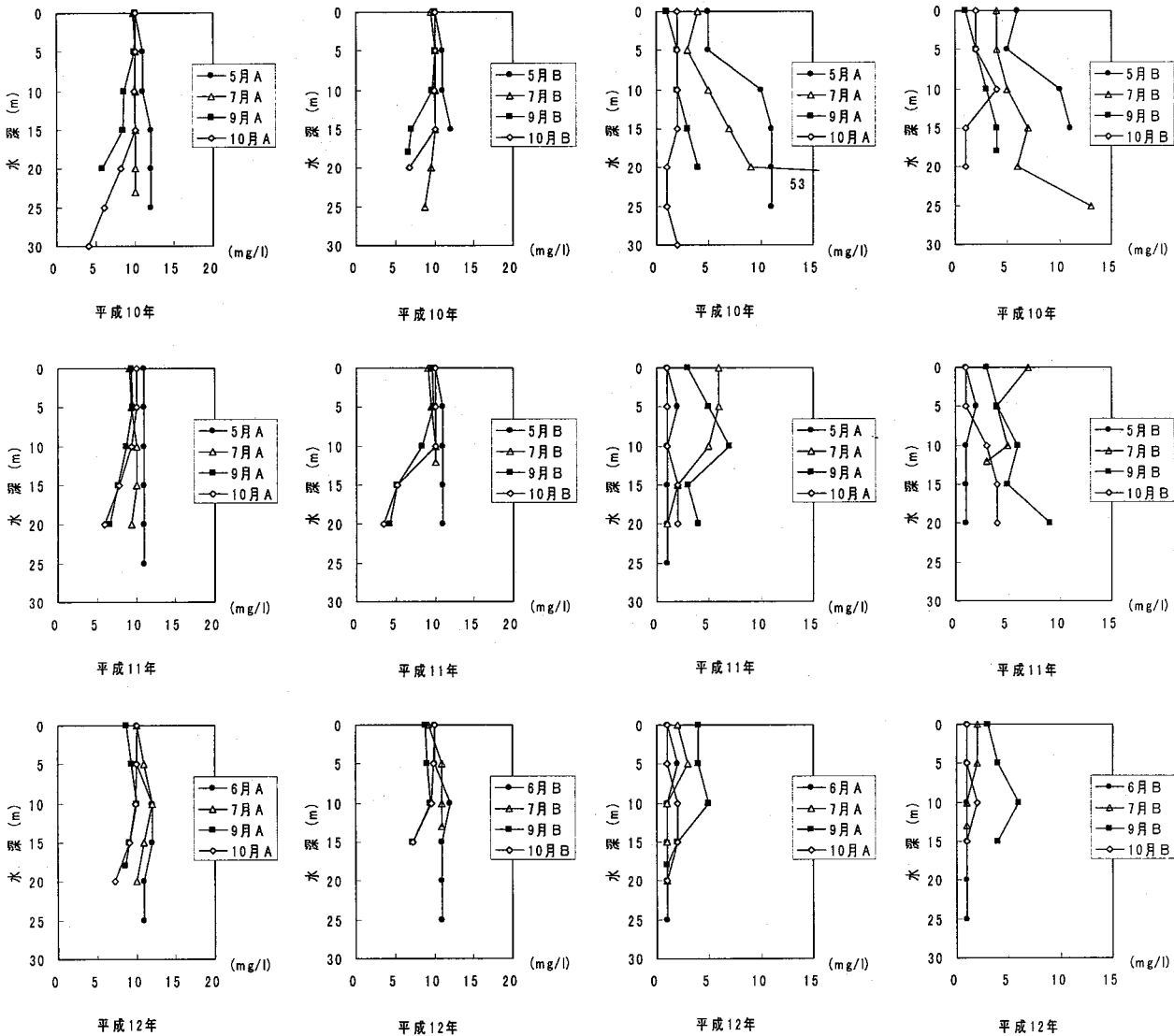


図5 山瀬ダムのDO分布

図6 山瀬ダムのSS分布

4.5 全窒素(T-N)及び全リン(T-P) (図7~9)

ダムサイト A 地点の平成10年~12年のT-Nは0.19~0.75 mg/Lの範囲で、B地点では0.17~0.76 mg/Lの範囲にあり、年平均値はA地点では0.30~0.36 mg/L、B地点では0.31~0.38 mg/Lとなっている。平成10年はA、B両地点とも変動が大きく、平成11年はA地点では7月、B地点では9月、10月を除き、大きな変化がなく推移している。平成12年はA、B両地点とも表層から下層まで比較的大きな変化がなく推移している。全般的に下層になると高くなる傾向があり、特に9月~10月が顕著である。

一方、平成10年~12年のT-Pは、ダムサイトA

地点では<0.003~0.038 mg/Lの範囲で、B地点では<0.003~0.027 mg/Lの範囲にあり、年平均値はA地点では0.004~0.013 mg/L、B地点では0.005~0.012 mg/Lとなっている。年平均値からみるとA、B両地点とも平成10年が高く、年々減少する傾向にあるが、平成10年はSSが高いことが影響していると考えられる。平成10年ではA、B両地点とも5月、7月に変動が大きく、下層になると高くなる傾向がみられ、平成11年にはA、B両地点とも表層が7月、9月に高い傾向がみられ、特にB地点の9月は0.008 mg/L前後で下層まで推移している。平成12年はA、B両地点とも表層から10 m層まで高くなっている。

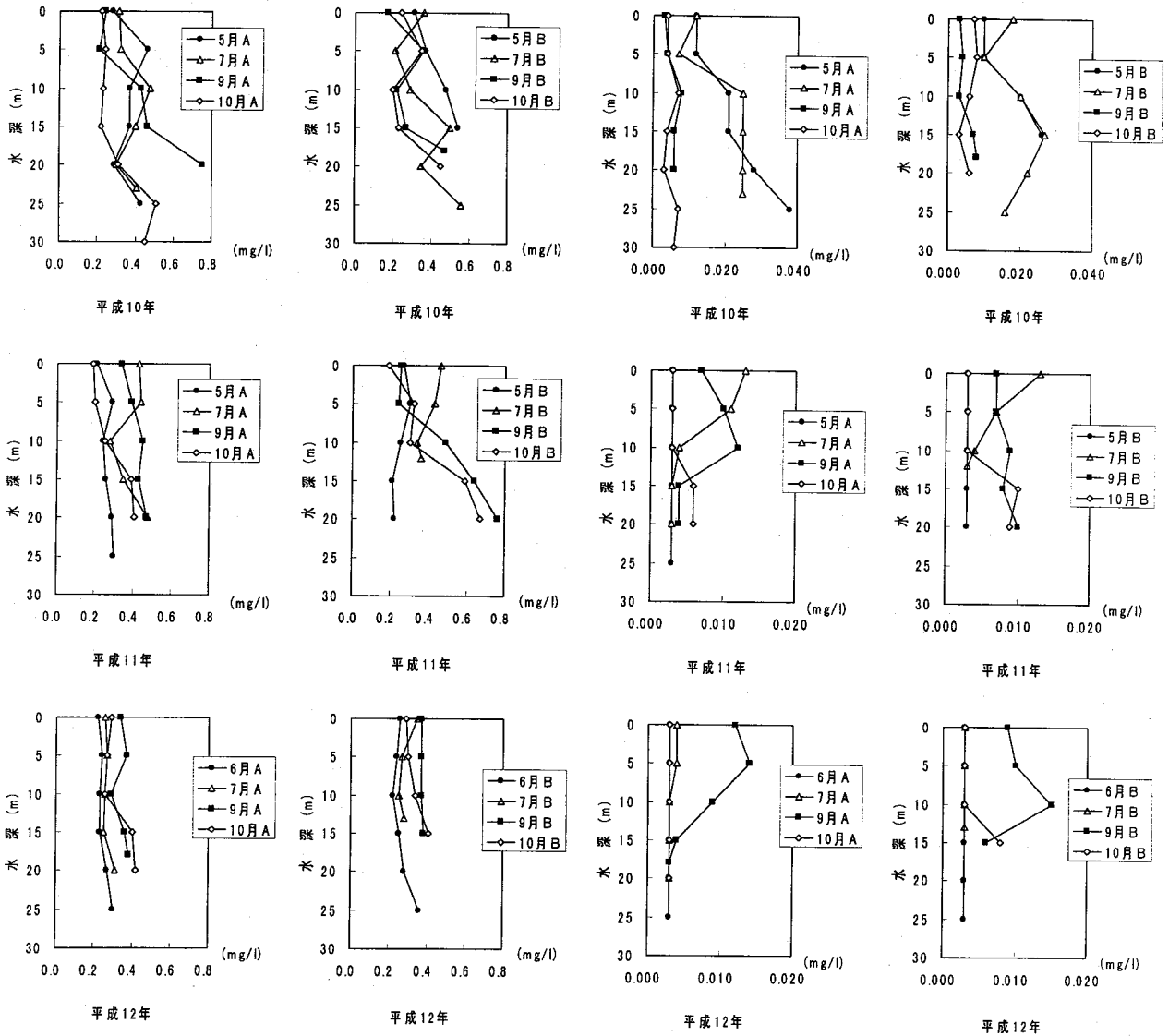


図7 山瀬ダムのT-N分布

図8 山瀬ダムのT-P分布

T-N, T-Pの年平均値を環境基準(本県では湖沼への窒素, リンの類型あてはめをしていない)に基づいて分類すると, 窒素でⅢ類型, リンでⅠ～Ⅲ類型に分類される。また, N/P比が27～75で, 山瀬ダ

ムはリンが制限的な栄養塩となっている湖沼であると推定できる³⁾。

流入河川についてみると, B地点に流入する岩瀬川, 繫ノ沢及び内町沢のT-Nの年平均値は, それぞれ0.27～0.37 mg/L, 0.17～0.20 mg/L, 0.20～0.24 mg/Lの範囲にあり, 岩瀬川が最も高く, ダムの濃度とほぼ同じ濃度で, 繫ノ沢及び内町沢はダムの濃度より低くなっている。

また, 岩瀬川, 繫ノ沢及び内町沢のT-Pの年平均値は, それぞれ0.004～0.008 mg/L, <0.003～0.003 mg/L, 0.003～0.006 mg/Lの範囲にあり, T-Nと同様に岩瀬川が最も高くなっている。3河川ともダムの濃度より低いか同じ濃度になっている。

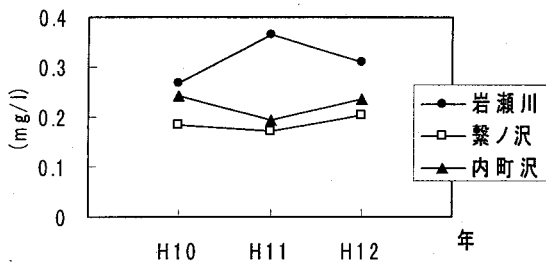


図9 山瀬ダム流入河川のT-N変化

4.6 化学的酸素要求量(COD) (図10～11)

ダムサイト A 地点の平成10年～12年のCODは0.9～2.3 mg/Lの範囲で、B 地点では1.0～2.5 mg/Lの範囲にあり、年平均値はA 地点では1.4～

2.1 mg/L、B 地点では1.5～2.1 mg/Lの範囲で、平成10年が最も高く年々減少している。全般的にA、B 両地点とも7月、9月に高くなる傾向がみられ、また表層から5 m層で高い傾向がみられる。

流入河川についてみると、岩瀬川、繋ノ沢及び内町沢のCODの年平均値は、それぞれ1.4～1.7 mg/L、1.4～1.8 mg/L、1.8～2.2 mg/Lの範囲にあり、内町沢が最も高くなっている。また、ダムの濃度と同様に平成10年が最も高く、平成11年～平成12年にかけては減少あるいはほぼ一定の値になっている。3河川ともダムの濃度より低いかほぼ同じ濃度になっている。

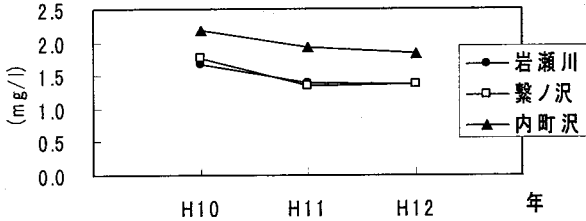


図10 山瀬ダム流入河川のCOD変化

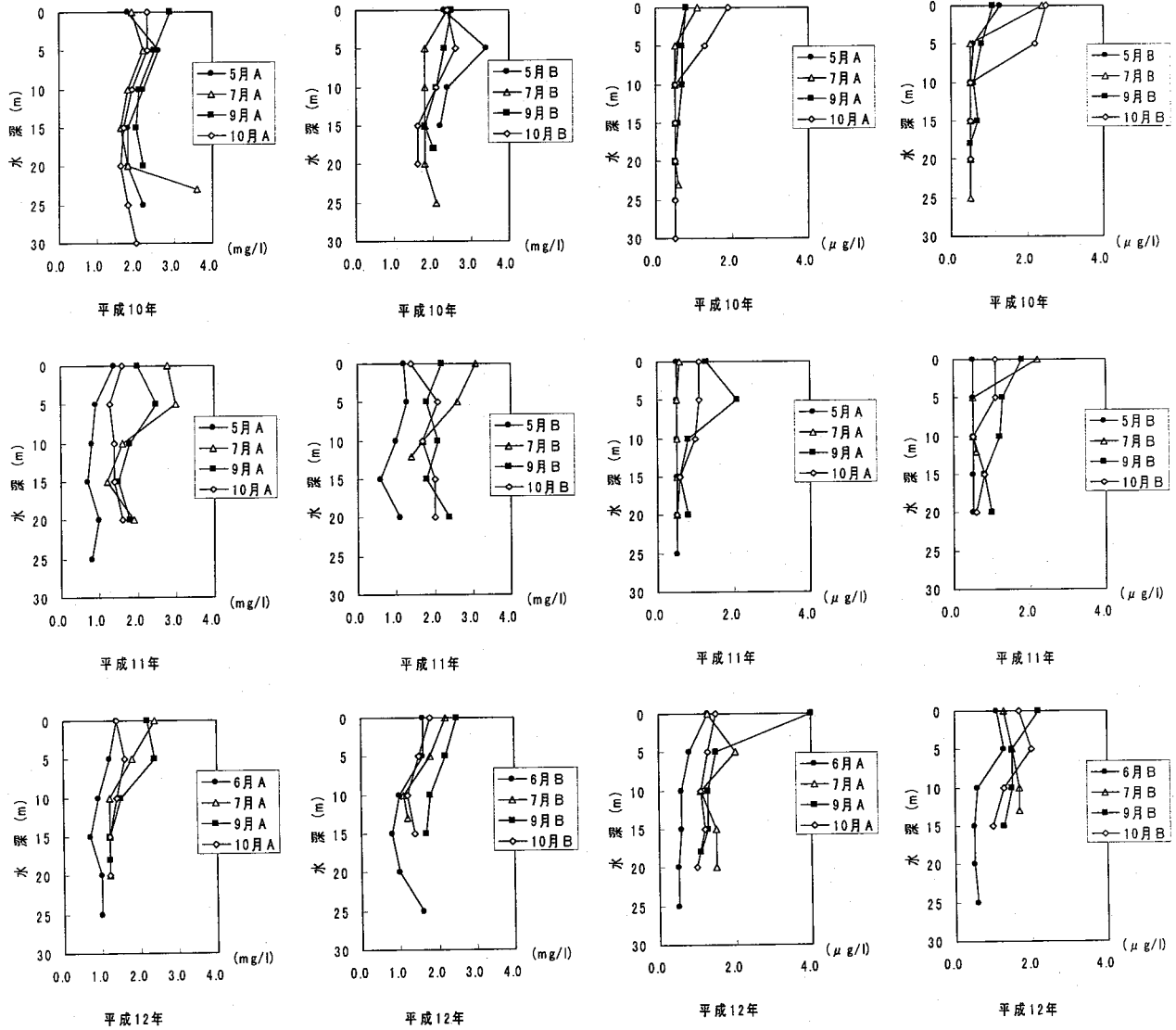


図11 山瀬ダムのCOD分布

図12 山瀬ダムのクロロフィルa分布

4.7 クロロフィル a (図12～13)

ダムサイト A 地点の平成10年～12年のクロロフィル a は $<0.5 \sim 4.0 \mu\text{g/L}$ の範囲で、B 地点では $<0.5 \sim 2.5 \mu\text{g/L}$ の範囲にあり、年平均値は A 地点では $0.6 \sim 1.2 \mu\text{g/L}$ 、B 地点では $0.8 \sim 1.2 \mu\text{g/L}$ の範囲にあり、年々上昇する傾向がみられ、A、B 両地点とも平成12年が最も高く、全般的に9月の表層が高い傾向になっている。流入河川についてみると、岩瀬川、繫ノ沢及び内町沢のクロロフィル a の年平均値は、それぞれ $0.5 \sim 1.1 \mu\text{g/L}$ 、 $0.5 \sim 0.8 \mu\text{g/L}$ 、 $0.5 \sim 1.0 \mu\text{g/L}$ の範囲にあり、ダム湖と同様3河川とも年々上昇する傾向がみられ、ダムの濃度より低いかほぼ同じ濃度になっている。

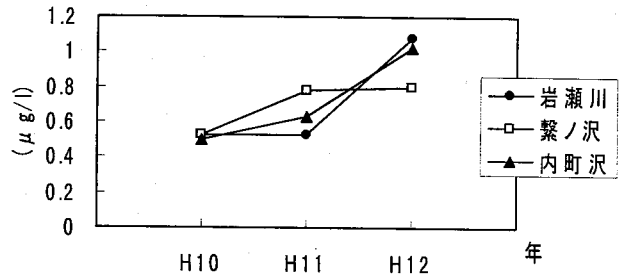


図13 山瀬ダム流入河川のクロロフィルa変化

4.8 透明度 (図14)

ダムサイト A 地点の平成10年～12年の透明度は $1.0 \sim 6.5 \text{ m}$ の範囲で、年平均値は平成10年が 1.9 m 、11年が 3.3 m 、12年が 3.5 m となっている。また、B 地点の平成10年～12年の透明度は $1.0 \sim 6.0 \text{ m}$ の範囲で年平均値は平成10年が 1.7 m 、11年が 3.1 m 、12年が 3.6 m となっている。A、B 両地点ともほぼ同じ値で推移し、平成10年を除いては5～6月及び10月が高くなっている。

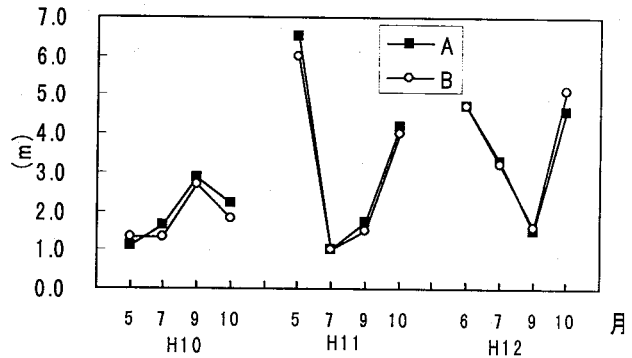


図14 山瀬ダムの透明度の推移

4.9 底質の調査結果 (図15～17)

ダム湖 A、B 両地点と流入3河川を比較してみると、特にダム湖底質のCODの含有量が流入河川の10倍以上と高く、T-N、T-P等でもダム湖A、B 両地点が流入3河川を上回っていることが多い。流入3河川で比較してみると、岩瀬川のT-Pが他の2河川よりも比較的高い濃度になっている。

ダム湖及び流入河川の底質中の各項目の含有量を平成10～12年度の年度別に比較すると、CODについては、流入河川は変化が見られないが、ダム湖では平成12年が比較的高い傾向を示している。T-Nについては、ダム湖及び流入河川ともに平成10年～12年にかけて年々減少している。T-Pについては、ダム湖及び流入河川ともに平成11年が最も高くなっている。また、平成10年及び12年を比較すると、流入河川では3河川ともにほぼ同じ濃度であるが、ダム湖では12年の方が高くなっている。

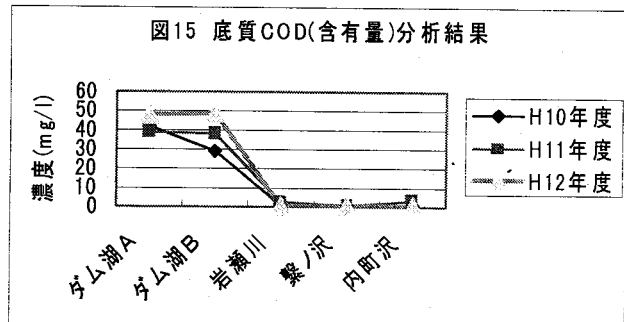


図15 底質COD(含有量)分析結果

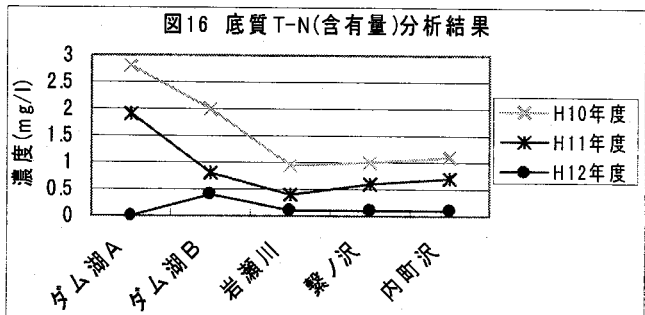


図16 底質T-N(含有量)分析結果

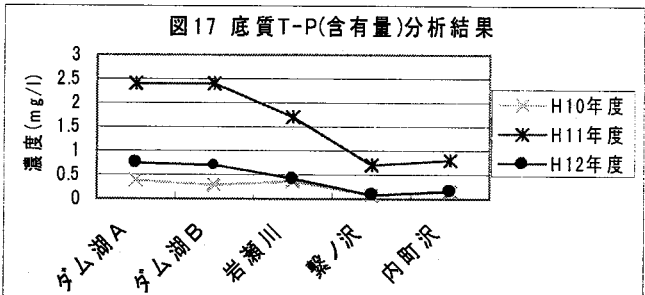


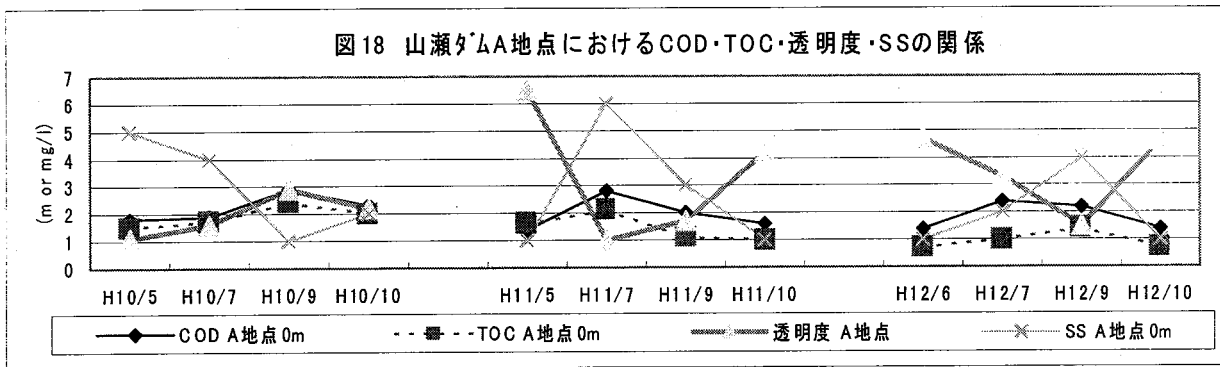
図17 底質T-P(含有量)分析結果

5. 考察

5.1 山瀬ダムの透明度, COD, SS との関係

平成 11 ~ 12 年のダム湖内の透明度は, 平均 COD 濃度及び SS が高いと悪くなり, 逆に低いとよくなる傾向がみられる(図 18)。しかし, 平成 10 年の調査では, SS 及び透明度が回復しても, COD が高くなる傾向があり, 特に 9 ~ 10 月の COD が高い。その原因として, TOC 濃度が COD と同様に高くなっていることから, 春頃から比較的長い期間にわたり, たくさんの雪解け水や雨水が流入河川等を経て, 大量の土砂と共にダム湖内に流入したこと

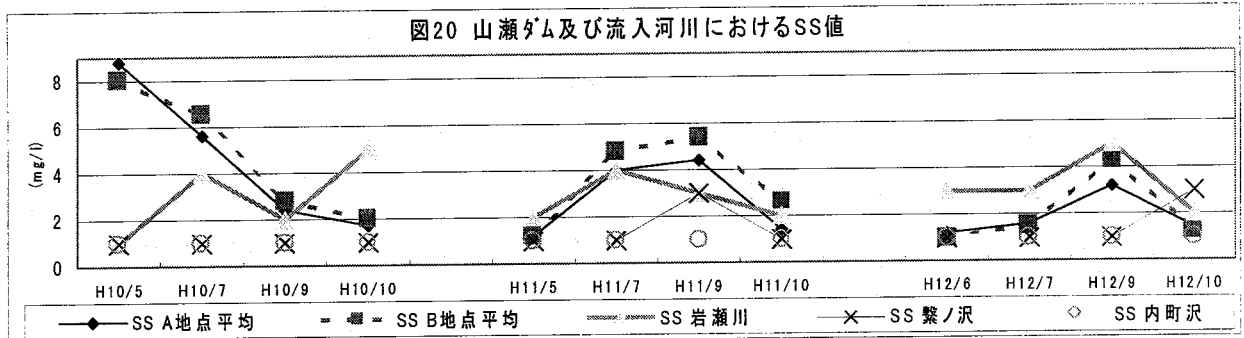
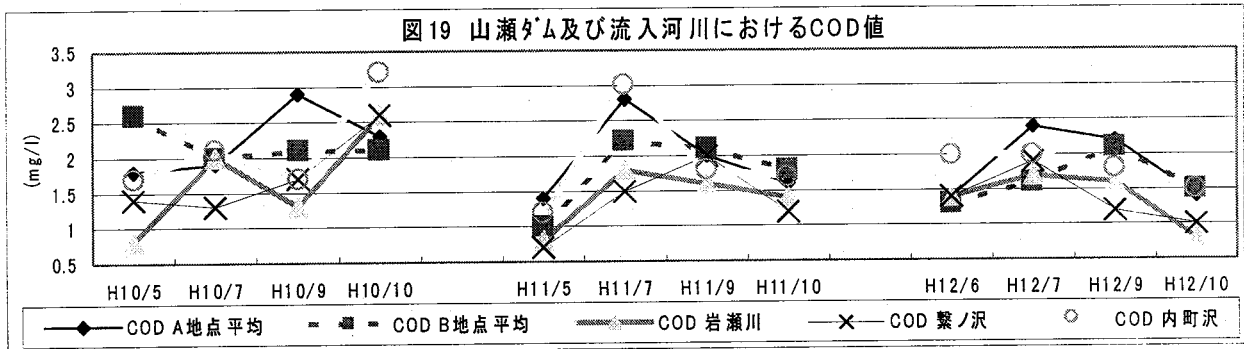
で 5 ~ 7 月頃の SS が高く, ダム湖内に大量に浮遊していた土砂等の有機成分が, 後に溶存性有機物として残留したことで 9 ~ 10 月の COD が高くなったものと推定される。また, 10 月については特にクロロフィル a が高かったことなどから, 内部生産による COD の上昇が主な原因であると考えられる。また, 透明度が 2 m 以下の時は, 表層の SS が 3 mg/L 以上, 透明度が 4 m 以上の時は表層の SS が 1 mg/L となっている。

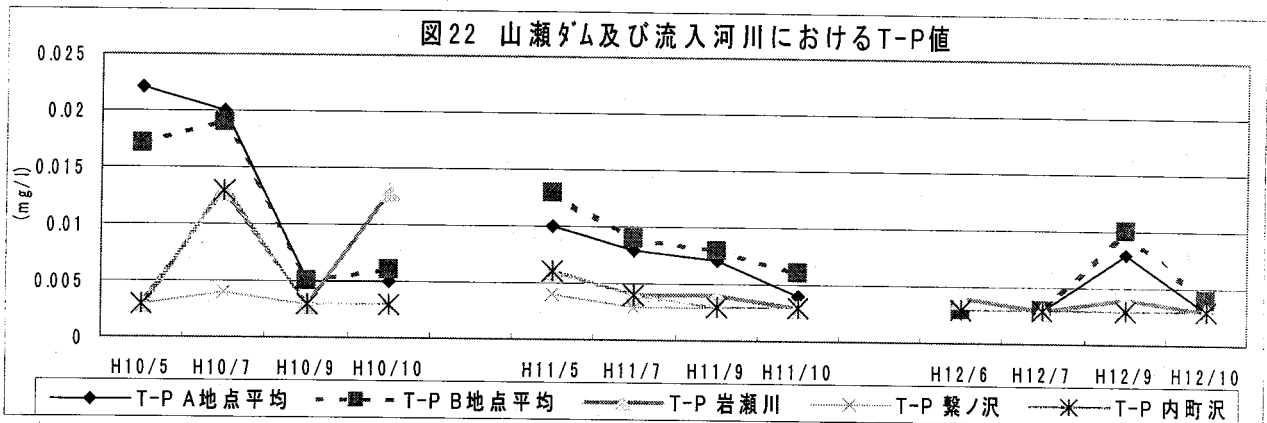
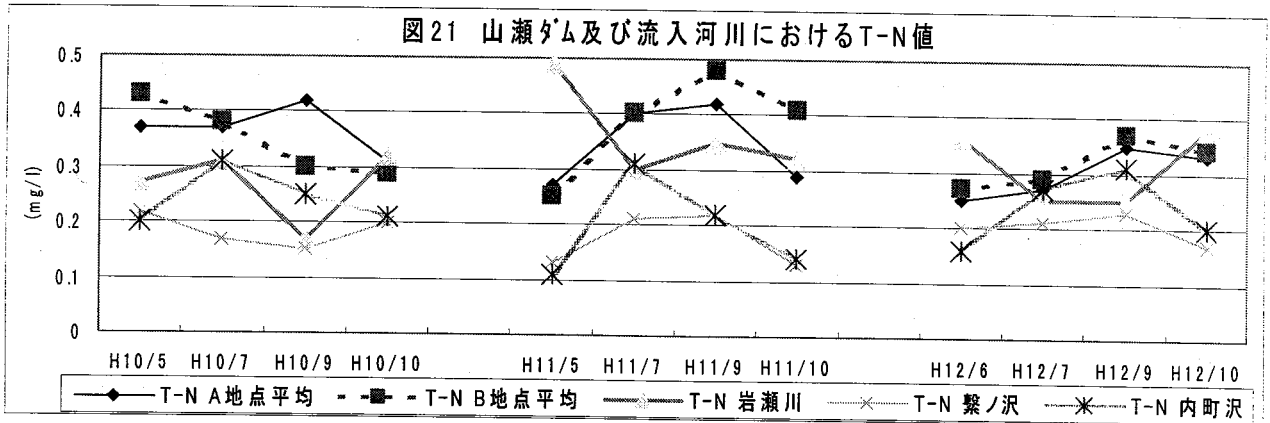


5.2 流入河川による山瀬ダムへの影響

山瀬ダムに流入する 3 河川のうち, 岩瀬川の流量が約 6 割前後(46 ~ 70 %)と最も多く, 内町沢及び繫ノ沢がそれぞれ約 2 割前後(内町沢 13 ~ 25 %, 繫ノ沢 12 ~ 29 %)である。また, 岩瀬川の SS, T-N, T-P 濃度(年平均濃度 SS 3 mg/L, T-N 0.27 ~ 0.37 mg/L, T-P 0.004 ~ 0.008 mg/L)が他の 2 河川よ

り高く(図 20 ~ 22), 内町沢の COD(年平均濃度 1.8 ~ 2.2 mg/L)が他の 2 河川より若干高い傾向がある(図 19)。以上のことから, ダム湖内の水質及び底泥の堆積には, 岩瀬川が大きく関与していると考えられる。また, 繫ノ沢は SS, T-N, T-P, COD 等の濃度が 3 河川中最も低く, ダム湖内への影響がほとんどないものとみられる。





5.3 岩瀬川の特徴及び山瀬ダムへの影響

ダム湖の pH がやや低くなっているのは、流入する3河川のうち、岩瀬川の酸性化による影響と考えられる。また、岩瀬川の T-N、T-P 等の濃度が他の2河川より高いこと、そして、岩瀬川の近くで赤倉鉱山の排水が流出していることから、平成11年～12

年には岩瀬川の上流部を含め、赤倉鉱山旧抗口、赤倉沢橋の pH、COD、T-N、T-P などの主な項目について追加調査を行った。

赤倉鉱山旧抗口から山瀬ダムまでの pH を平成11年度については図23、12年度については図24に示す。(山瀬ダム A 及び B は表層のデータを使用)

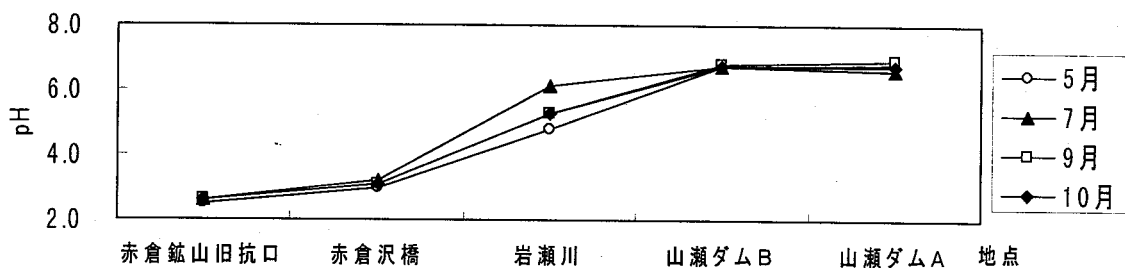


図23 赤倉鉱山旧抗口から山瀬ダムまでの pH 変化(H11)

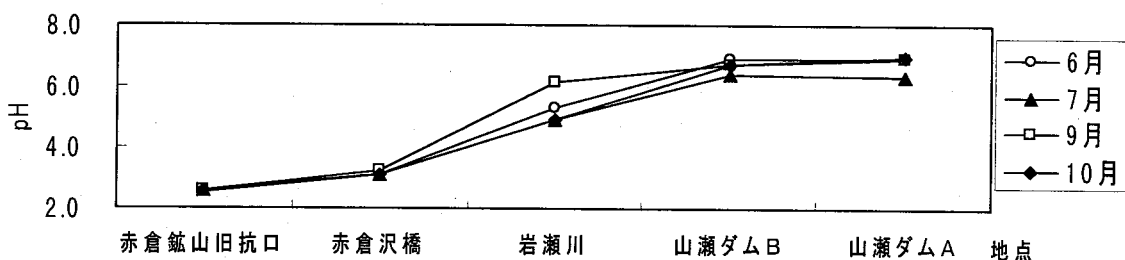


図24 赤倉鉱山旧抗口から山瀬ダムまでの pH 変化(H12)

赤倉鉦山旧抗口の平成11年～12年のpHは2.5～2.6、赤倉沢橋のpHは3.0～3.2の酸性水であり、pH値の幅がほぼ一定である。また、赤倉鉦山旧抗口及び赤倉沢橋の酸性水が合流する前の岩瀬川の上流水のpHは6.9～7.3の中性で、ほとんど変化がみられないが、酸性水合流後の岩瀬川のpHは4.8～6.1の弱酸性水となっており、pHの変動が大きくなっている。以上のことから、岩瀬川の酸性化の原因は、休廃止鉦山の赤倉鉦山の酸性排水が赤倉沢橋を経て岩瀬川に流入しているためであり、酸性水合流後の岩瀬川のpHの変動が大きいのには、降雨等による赤倉沢橋から岩瀬川に流入する水量の変化も考えられるが、上流部から流れてくる岩瀬川自体の水量の変化が主な原因であると推察される。

また、赤倉鉦山旧抗口排水が、硫酸イオン、T-Fe、Al、Ca、ケイ酸等を高濃度に含有した硫酸酸性水

であるが、その酸性排水が岩瀬川へ合流した後、pHの急激な上昇とともに硫酸イオン、T-Fe、Al、Ca、ケイ酸等の濃度が大きく低下している。また、岩瀬川上流と比べて酸性水合流後の岩瀬川のSSが上昇する傾向があることから、硫酸イオン、T-Fe、Al、Ca、ケイ酸等の沈殿物がSS濃度を高める原因の一つであると考えられる。

赤倉鉦山旧抗口から山瀬ダムまでのCODの濃度変化については図25～26に示す。(山瀬ダムA及びBは表層のデータを使用)

赤倉鉦山旧抗口、赤倉沢橋及び岩瀬川のCODは、ダム湖より低いかほぼ同じ濃度となっている。これは、赤倉鉦山旧抗口排水の有機物の含有量が少なく、また、強い酸性水のために内部生産によるCODの増加も、ほとんど望めないことによるものであると考えられる。

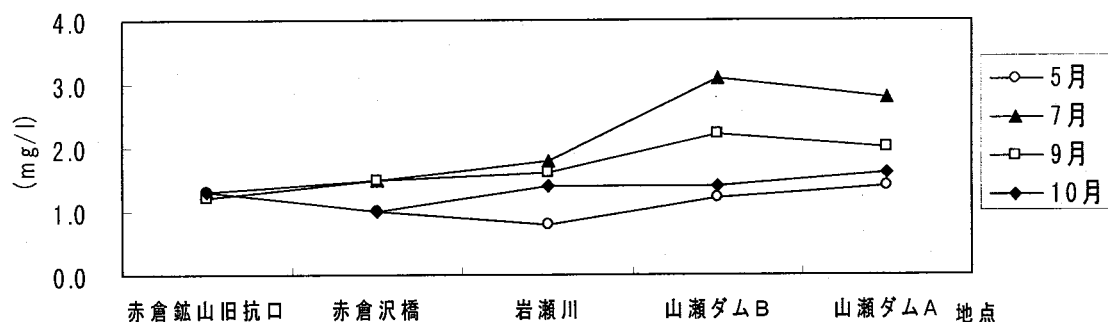


図25 赤倉鉦山旧抗口から山瀬ダムまでのCOD変化(H11)

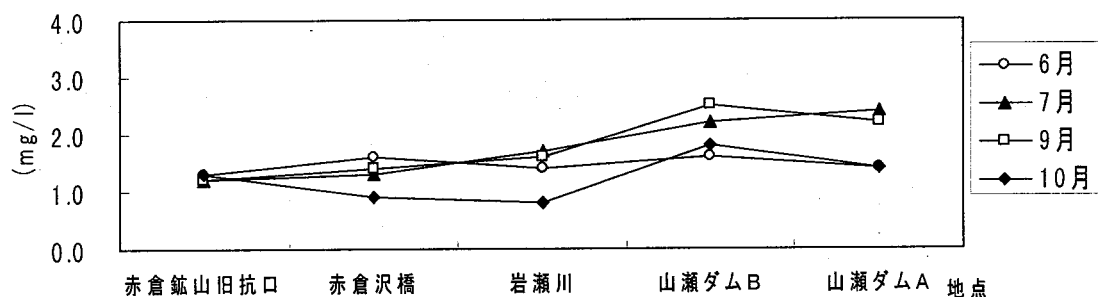


図26 赤倉鉦山旧抗口から山瀬ダムまでのCOD変化(H12)

赤倉鉦山旧抗口から山瀬ダムにいたるT-Nについては図27～28に、T-Pについては図29～30に示す。(山瀬ダムA及びBは表層のデータを使用)

T-N、T-P濃度は、赤倉鉦山旧抗口で非常に高くなっているが、赤倉沢橋では特にT-Pが大きく減少し、酸性水合流後の岩瀬川ではダム湖とほぼ同じ濃

度となっている。岩瀬川上流(酸性水合流前)と酸性水合流後との水質を比較すると、酸性水合流後にはT-N濃度が約3倍上昇しており(平均T-N濃度、上流0.12～0.13 mg/L、合流後0.31～0.37 mg/L)、岩瀬川及びダム湖のT-N濃度を押し上げる大きな要因となっている。

また、T-P については岩瀬川上流でもある程度検出され、酸性水合流後でも T-P 濃度がほとんど変化していないことから、酸性水及び岩瀬川上流水とも

にダム湖内への T-P の蓄積に関与していると考えられる。

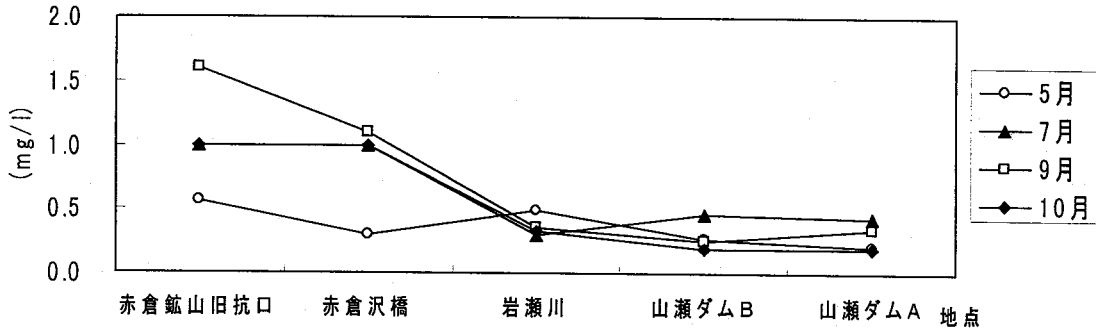


図27 赤倉鉦山旧抗口から山瀬ダムまでのT-N変化(H11)

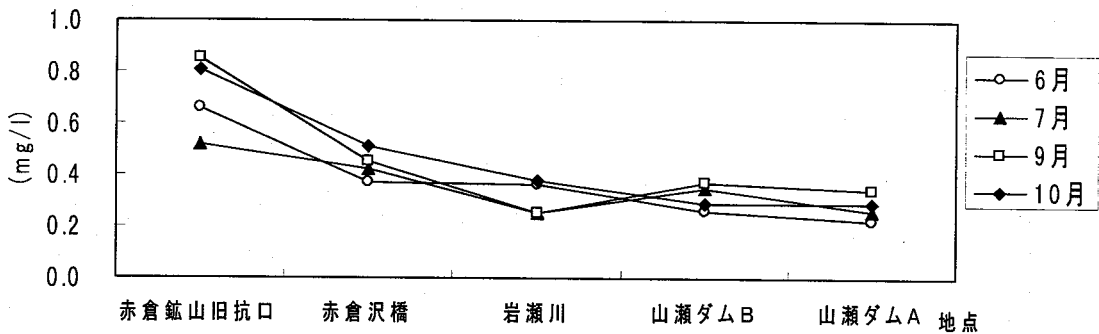


図28 赤倉鉦山旧抗口から山瀬ダムまでのT-N変化(H12)

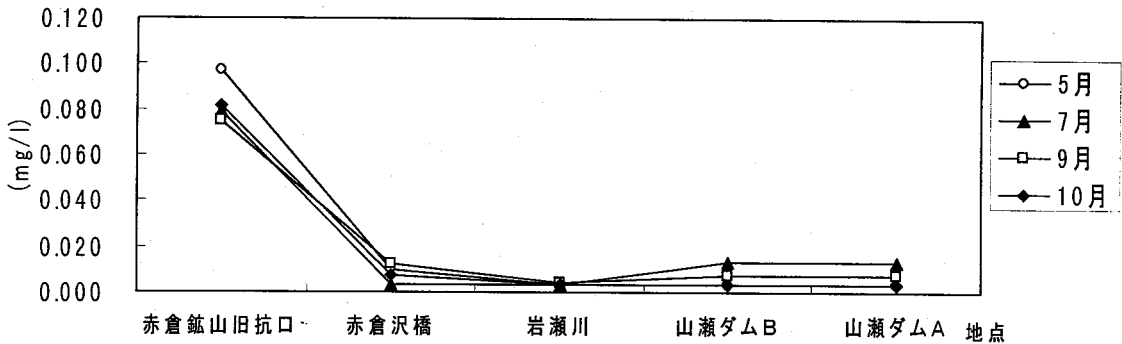


図29 赤倉鉦山旧抗口から山瀬ダムまでのT-P変化(H11)

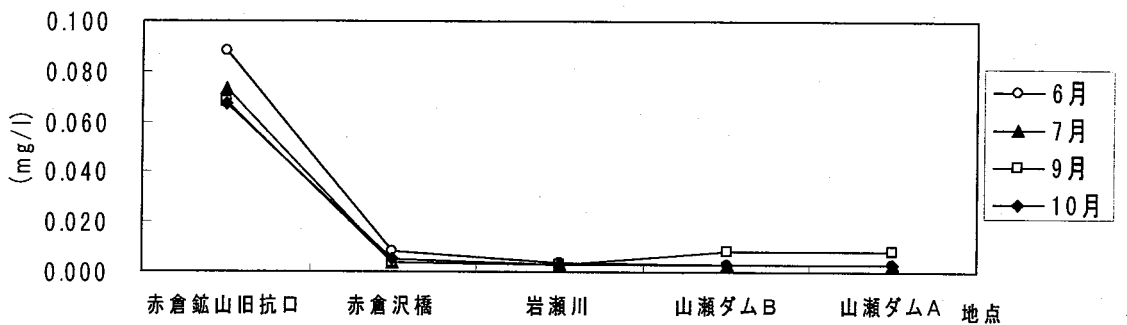
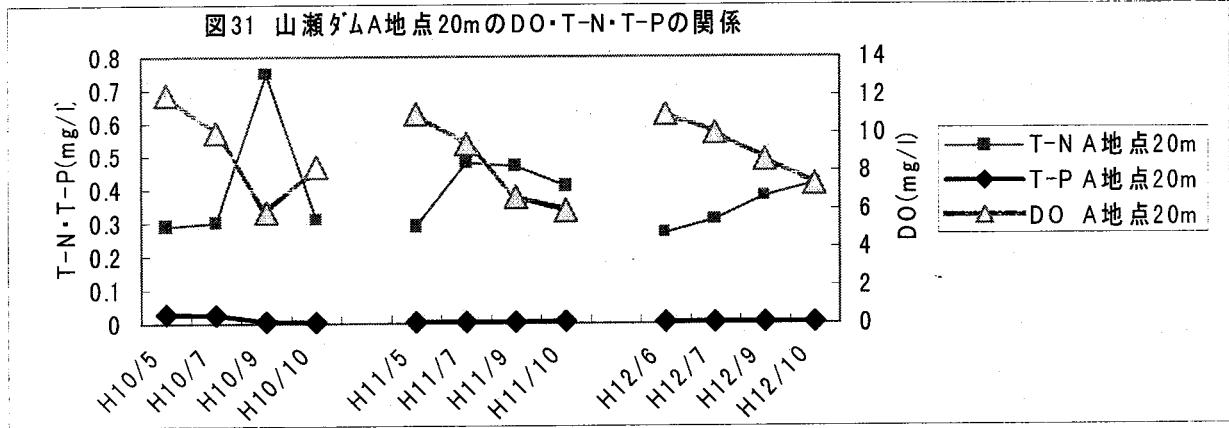


図30 赤倉鉦山旧抗口から山瀬ダムまでのT-P変化(H12)

5.4 山瀬ダムの内部生産 (図31)

7～9月にかけてダム湖内の表層水の水温上昇に伴い、表層のクロロフィルa濃度の上昇がみられ、COD濃度も高くなる傾向があることから、この時期には植物プランクトンの内部生産によりCODが

上昇していると推察される。また、9～10月には10～15m以深でDOの減少がみられると同時にT-Nが高くなる傾向があるが、T-Pには大きな変化は認められないため、栄養塩の溶出はわずかであると考えられる。



5.5 まとめ

山瀬ダム湖内(A地点全層)の年平均COD濃度は、平成10年2.1 mg/L、11年1.6 mg/L、12年1.4 mg/Lとなり年々減少する傾向にあるが、平成10～11年の大雨・長雨等による自然発生的な要因で一時的に水質が濁ったことによるものであると考えられる。また、平成4～9年の過去6年間の年平均COD濃度(平成4年から順に1.4 mg/L、1.1 mg/L、1.3 mg/L、1.5 mg/L、1.4 mg/L、3.8 mg/L)と比較しても、平成9年度を除き大きな変化はなく、水質汚濁がほとんど進行していないと考えられる。

山瀬ダムの上流部には人為的な汚染がほとんどないことから、ダム湖内のCOD上昇の原因としては、流入河川からのSS成分の流入と、湖内の植物プランクトンによる内部生産が主な要素であると考えられる。

今後、山瀬ダムの水質が環境基準を超過している他のダム湖の水質レベルまで悪化する可能性は低いと思われるが、年月の経過と共にダム湖内に堆積す

る有機物等の増加によっては、ダムが徐々に富栄養化する可能性も考えられる。したがって、山瀬ダムの水質調査を継続的又は定期的を実施し、水質の変化を長期的に監視することが望ましい。

参考文献

- 1) 人工湖の水質汚濁機構解明に関する調査研究(第1報)－萩形ダム、山瀬ダム－, 秋田県環境技術センター年報, 第20号, 98-106, 1992.
- 2) 人工湖の水質汚濁機構解明に関する調査研究(第2報)－萩形ダム、山瀬ダム－, 秋田県環境技術センター年報, 第22号, 45-55, 1994.
- 3) 人工湖(皆瀬ダム・山瀬ダム)の水質汚濁機構解明に関する調査研究, 秋田県環境技術センター年報, 第25号, 50-56, 1997.
- 4) 山瀬ダム(パンフレット), pp.1-4, 秋田県山瀬ダム・発電所建設事務所, 1990.

八郎湖のアオコ毒素等水質動態調査（平成10～12年度環境省委託調査）

吉田 昇・加藤 潤*・渡辺 寿**

要 旨

環境省の委託事業として平成10年度から12年度の3年間、八郎湖調整池におけるアオコ形成藻類及びアオコ毒素マイクロシスチンの環境中の濃度動態を把握するため、八郎湖湖心において調査を実施した。アオコの発生状況については、各年度とも肉眼でアオコが観察され、アオコ形成プランクトンの優占種は、10年度及び12年度は藍藻類のアナベナ属で、11年度はマイクロキスティス属であった。全マイクロシスチン濃度は、10年度 $< 0.1 \sim 3.2 \mu\text{g/L}$ 、11年度 $0.5 \sim 5.0 \mu\text{g/L}$ 、12年度 $0.1 \sim 0.3 \mu\text{g/L}$ で、3種類のマイクロシスチン-RR、-YR、-LRの各異性体濃度は、11年度に-RRが $2.7 \mu\text{g/L}$ 、 $3.2 \mu\text{g/L}$ の2回検出された以外はいずれも $0.1 \mu\text{g/L}$ 未満であった。

アオコ発生時の水質項目の変動については、pH、DO、T-N、T-P、クロロフィルaに濃度の上昇が見られたが、N/P比は平年9前後であるのに対し、アオコ形成プランクトンの優占種がアナベナ属であった平成10年度及び12年度はそれぞれ15、13であり、マイクロキスティス属が優占種であった11年度は6で、アオコ形成プランクトンの優占種によって大きな違いが見られた。マイクロシスチンと水質項目との相関については、マイクロシスチンが低濃度であるため、認められなかった。

1. はじめに

閉鎖性水域の富栄養化に伴うアオコの発生は、景観や水質を悪化させるだけでなく、アオコ毒素として肝臓毒マイクロシスチン（異性体：-RR、-YR、-LR）などの有毒物質を産生することが明らかになっており、オーストラリアやイギリスなどの国々では家畜等がアオコを含んだ水を飲み死亡するという事故が発生し、大きな社会問題となっている。平成10年には、WHO（世界保健機構）から有毒アオコと有毒物質に関する報告がなされ、飲料水及び環境水中のマイクロシスチンLR濃度（ $1 \mu\text{g/L}$ 以下）について勧告がなされた。

本調査は、例年アオコの発生が見られる八郎湖において、平成10年度から12年度の3年間、環境省の委託調査として実施した「アオコ形成藻類の動態及び毒素に関する調査」の結果をとりまとめたものである。なお、本調査はマイクロシスチンの環境中の濃度動態を調査し、かつ、マイクロシスチンとアオコ形成プランクトン相などの関係を検討することによって、アオコの外見上の増減とマイクロシスチンとの関係について、基礎的知見を得ることを目的として

実施したものである。

2. 調査湖の概況

八郎湖は秋田市の北方約20 kmに位置し、かつて全国で琵琶湖について2番目の広さを持つ汽水湖（東西12 km、南北27 km、総面積22,024 ha）であった八郎湖が「国営八郎湖干拓事業」により約80%が干拓され、現在では東部承水路、西部承水路、調整池として4,564 haの広さを持つ淡水の湖となっている。¹⁾

八郎湖の流域面積は約823 km²で、周辺から約20の中小河川が流入している。湖水は大瀧村の農業用水や水道水として利用されており、フナやワカサギなどの内水面漁業も行われている。八郎湖はCOD、T-N、T-Pとも極めて高い濃度レベルで富栄養化が進んでおり、平成11年の夏には連日の猛暑と小雨により湖面全体に大量のアオコが発生し、つくだ煮用のワカサギ漁への影響や水道水の異臭問題が出るなど、八郎湖の水質浄化対策のより一層の推進とあわせ、アオコの発生機構解明のための調査や発生防止対策の実施が強く求められている。

*現秋田県北部流域下水道事務所

**現秋田県水産振興センター

3. 調査方法

3.1 調査地点

例年アオコの発生が確認されている八郎湖調整池を調査対象とし、調査地点は八郎湖湖心と、対照地点として八郎湖大潟橋の2カ所とした。

(図1～2)

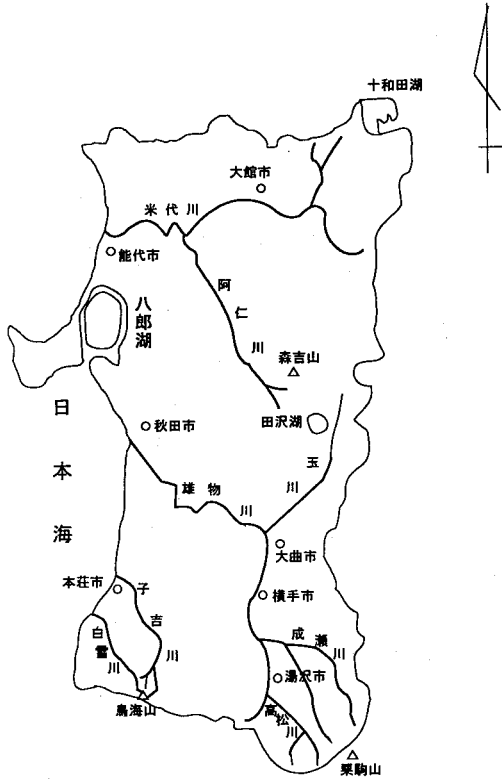


図1 八郎湖の位置図

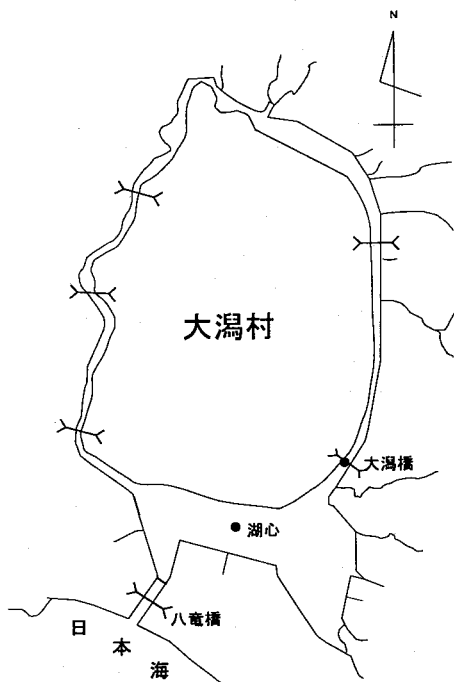


図2 八郎湖調整池調査地点図

3.2 調査期間

調査期間はアオコが発生している時期とし、平成10年度は9月2日から9月11日までに5回、平成11年度は8月26日から9月14日までに6回、平成12年度は7月24日から9月4日までに10回のサンプリングをそれぞれ実施し、バケツによる表層水採取を行った。

3.3 分析方法

3.3.1 ミクロシスチン (-RR, -YR, -LR) 濃度 及び全マイクロシスチン濃度

マイクロシスチンの分析は、既存の分析法を参考に3異性体(-RR, -YR, -LR)はHPLCで、全マイクロシスチンはGC/CI-MSで測定^(注)した^{2~3)}。マイクロシスチンの前処理は、試料水をGF/Cでろ過し、ろ液はSep-Pak C18Plusで固相抽出し、その後Sep-Pak Plus シリカゲルでクリーンアップして、HPLC測定用試料とした。ろ過物は、凍結後5%酢酸で抽出・ろ過後、ろ液と同様の操作を行った。GC/CI-MS測定用試料は、Sanoらの方法⁴⁾によりマイクロシスチンを酸化剤によりMMPB(erythro-2-methyl-3-methoxy-4-phenylbutyric acid Sodium Salt)とし、14%三フッ化ホウ素-メタノール溶液でメチルエステル誘導体化し、ヘキサンで抽出した。

(注) 全マイクロシスチンの測定は、平成10年度、11年度は国立環境研究所で、平成12年度は株式会社島津製作所つくば支店で実施した。
(前処理後の検体を各機関へ送付)

3.3.2 優占プランクトン

水中に含まれる全アオコ量(mg/L)の乾燥重量を測定したほか、採水時及び検鏡時に写真撮影を行った。

3.3.3 水質項目

(pH, DO, SS, T-N, NH₄-N, NO₃-N, T-P, PO₄-P, COD, クロロフィルa)

水質項目については、工場排水試験方法JIS-K0102⁵⁾及び海洋観測指針⁶⁾に準じて測定した。

3.4 分析条件

HPLC 及び GC/CI-MS 等測定における分析条件は、以下のとおりである。

《HPLC》

カラム : Mightysil RP-18(粒径 5 μ m, 4.6 mm I.D. \times 150 mm L.)
 カラム温度 : 40 $^{\circ}$ C
 溶離液 : メタノール : 50 mM リン酸緩衝液 (pH3.0) = 60 : 40
 流速 : 1.0 mL/min
 測定波長 : UV 239 nm

《GC/CI-MS》

カラム : DB-1 (膜厚 0.25 μ m, 0.25 mm I.D. \times 150 mm L.)
 キャリアガス : He 100 kPa
 カラム温度 : 80 $^{\circ}$ C \rightarrow 250 $^{\circ}$ C (15 $^{\circ}$ C/分)
 注入口温度 : 250 $^{\circ}$ C

《GC-MS》

GC 部

カラム : DB-5 (0.25 μ m df, 0.25 mm I.D. \times 30 mm L.)
 キャリアガス : He 100 kPa
 カラム温度 : 80 $^{\circ}$ C (2 分) -5 $^{\circ}$ C/分-180 $^{\circ}$ C-15 $^{\circ}$ C/分-250 $^{\circ}$ C

注入方法 : スプリットレス注入法

サンプリング時間 : 2 分

注入口温度 : 250 $^{\circ}$ C

IF 温度 : 250 $^{\circ}$ C

MS 部

イオン化法 : PCI

測定モード : SIM

質量範囲 : m/z = 223, 226

検出器ゲイン : 1.3 kv

4. 調査結果

4.1 気温、降水量及び水温

調査対象水域における気象等の状況は次のとおりである。

平成 10 年度は、気温、日照時間、水温とも平年を上回り、降水量が少なかった。⁷⁾

平成 11 年度は気温、水温が平年を上回ったものの、日照時間は 8 月下旬と 9 月中旬に平年を下回り、降水量が平年を上回った。⁸⁾

平成 12 年度は、気温、日照時間、水温とも平年

を上回り、降水量が少なかった。⁹⁾

4.2 アオコの発生状況

平成 10 年度には、湖心でアオコの発生が肉眼で 2 回観察されたが、対照地点の大潟橋ではアオコの発生は見られなかった。湖心におけるアオコ形成プランクトンの優占種は、藍藻類のアナベナ属であった。

平成 11 年度には、湖心で全ての採水時にアオコの発生が肉眼で観察され、大潟橋では 8 月下旬にアオコの発生が見られたが、それ以降は発生が見られなかった。湖心におけるアオコ形成プランクトンの優占種は、藍藻類のマイクロシスティス属であった。

平成 12 年度には、湖心、大潟橋ともに 7 月下旬、8 月上旬にアオコの発生が肉眼で観察された。湖心におけるアオコ形成プランクトンの優占種は、藍藻類のアナベナ属であった。

4.3 ミクロシスティン濃度

平成 10 年度には、全マイクロシスティンは湖心で 3.2 μ g/L の濃度が 1 回検出されたのみで、残りは全て 0.1 μ g/L 未満であった。マイクロシスティン (-RR, -YR, -LR) は全ての検体で 0.1 μ g/L 未満であった。

平成 11 年度には、全マイクロシスティンは湖心で 0.5 ~ 5.0 μ g/L、大潟橋で 0.8 ~ 8.7 μ g/L 検出された。マイクロシスティンは、湖心及び大潟橋とも -RR のみが検出され、その濃度範囲はいずれも <0.1 ~ 3.2 μ g/L であった。全マイクロシスティンとマイクロシスティン -RR との相関は、低濃度であるため、認められなかった。

平成 12 年度は全マイクロシスティンが湖心で 0.1 ~ 0.3 μ g/L、大潟橋で 0.1 μ g/L 検出された。マイクロシスティン (-RR, -YR, -LR) は、全ての検体で 0.1 μ g/L 未満であった。

4.4 水質特性

湖心及び対照地点である大潟橋における、pH、DO、SS、クロロフィル a、T-N、T-P の年度別平均値は図 3 ~ 6 である。

平成 10 年度は、湖心で DO、クロロフィル a、SS が平年を上回ったが、大潟橋ではほぼ平年並みであった。

平成 11 年度は、湖心で T-N、T-P が平年を上回ったが、DO、クロロフィル a は平年を下回った。

大瀧橋では、T-N、T-P が平年を上回り、DO が平年を下回った。

平成 12 年度は、湖心で T-N、クロロフィル a、SS が平年を上回り、大瀧橋ではほぼ平年並みであった。

植物プランクトンの増殖に係る N/P 比は、八郎湖湖心では平年 9 前後であるが、アオコ形成プランクトンの優占種として藍藻類のアナベナが観察された平成 10 年度、12 年度はそれぞれ 15 及び 13 で、優占種として藍藻類のミクロキスティスが観察され

た平成 11 年度は 6 と、アオコ形成プランクトンの優占種によって大きな違いが見られた。

SS をアオコ藻体の乾重量と見なした場合のアオコ藻体 1g 当たりの全マイクロシスチンの最大値は、八郎湖湖心で、平成 10 年度が 356 $\mu\text{g/g}$ 、平成 11 年度が 471 $\mu\text{g/g}$ 、平成 12 年度が 50 $\mu\text{g/g}$ であった。

八郎湖における 3 年間の調査では、マイクロシスチン (-RR, -YR, -LR) が低濃度であったため、マイクロシスチンと水質項目との間に相関は認められなかった。

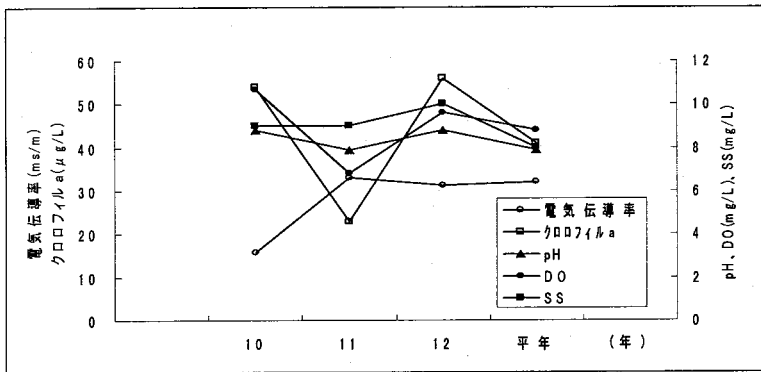


図3 湖心の電気伝導率、クロロフィル a、pH、DO、SS の平均値

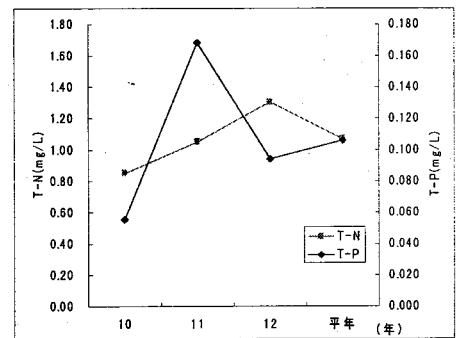


図4 湖心の T-N、T-P の平均値

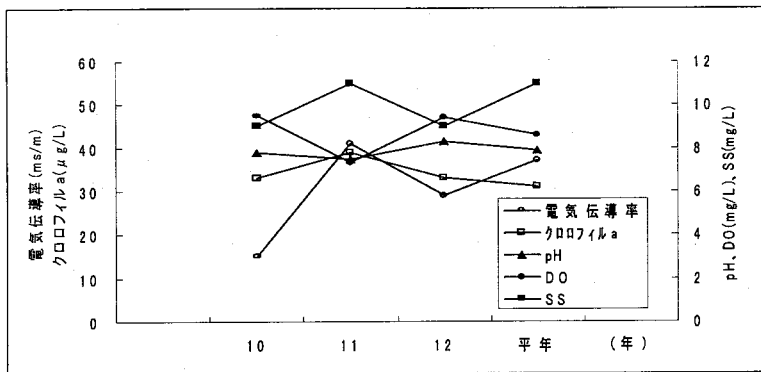


図5 大瀧橋の電気伝導率、クロロフィル a、pH、DO、SS の平均値

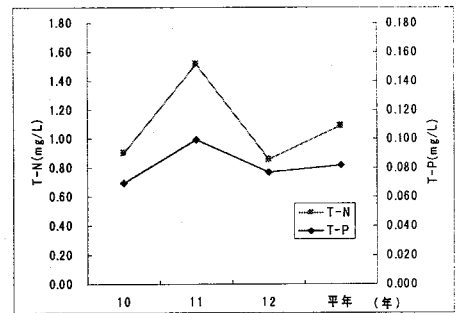


図6 大瀧橋の T-N、T-P の平均値

5. ミクロシスチン毒素の代替指標の検討

日常的に SS、T-N、T-P、クロロフィル aなどをモニタリングして、これらの項目が通常と比較して異常に高い値となり、肉眼的にアオコが観察され、更に顕微鏡でマイクロシスチンを産生する可能性のある藍藻が確認できれば、アオコ毒マイクロシスチンが産生されている可能性があるとして推測される。環境省の委託事業として、他県の研究機関が行った調査によると、マイクロシスチン濃度が数 $\mu\text{g/L}$ ~ 数十 $\mu\text{g/L}$ 以上の場合には、SS や T-N、T-P、クロロフィル a

などの水質項目で、マイクロシスチンの産生の有無を判断できることが示唆されている。しかし、生物間の競合や気象状況の違いにより、アオコを形成するプランクトン種やその発生状況、マイクロシスチンの産生状況も変わることなどを考えると、マイクロシスチン毒素の代替指標については、各調査湖沼において今後さらにデータを蓄積し、検討する必要があると考えられる。

表1 平成10年度水質調査結果

(調査地点名：八郎湖湖心)

採取年月日	気温(°C)	水温(°C)	pH	DO(mg/L)	SS(mg/L)	T-N(mg/L)	NH ₄ -N(mg/L)	NO ₃ -N(mg/L)	T-P(mg/L)	PO ₄ -P(mg/L)	クロロフィルa(μg/L)	T-MC(μg/L)	MC-RR(μg/L)	MC-YR(μg/L)	MC-LR(μg/L)	植物プランクトン優占種
H10.9.2	30.0	25.5	8.7	12	9	0.58	0.07	<0.05	0.046	0.010	49	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	アナヘナ
H10.9.4	24.5	25.5	9.1	-	9	0.72	<0.05	0.33	0.055	0.020	48	3.2	<0.1	<0.1	<0.1	アナヘナ
H10.9.7	27.0	23.1	8.1	8.8	12	0.65	<0.05	0.34	0.050	0.019	50	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	アナヘナ
H10.9.9	29.0	25.0	9.1	11	9	1.0	<0.05	0.38	0.062	0.020	59	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	アナヘナ
H10.9.11	27.0	26.5	9.2	11	8	1.3	0.42	0.10	0.065	0.026	67	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	アナヘナ

(対照地点名：八郎湖大瀧橋付近)

採取年月日	気温(°C)	水温(°C)	pH	DO(mg/L)	SS(mg/L)	T-N(mg/L)	NH ₄ -N(mg/L)	NO ₃ -N(mg/L)	T-P(mg/L)	PO ₄ -P(mg/L)	クロロフィルa(μg/L)	T-MC(μg/L)	MC-RR(μg/L)	MC-YR(μg/L)	MC-LR(μg/L)	植物プランクトン優占種
H10.9.2	30.3	25.5	7.1	10	15	1.3	0.06	<0.05	0.084	0.014	42	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
H10.9.4	29.0	26.3	8.7	-	8	0.65	<0.05	0.40	0.058	0.017	35	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
H10.9.7	32.5	25.5	7.5	9.3	10	0.87	<0.05	0.34	0.065	0.024	30	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
H10.9.9	29.0	25.2	7.5	8.7	6	0.58	<0.05	0.30	0.058	0.018	16	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
H10.9.11	26.5	26.5	8.5	10	9	1.1	<0.05	<0.05	0.082	0.020	43	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	

表2 平成11年度水質調査結果

(調査地点名：八郎湖湖心)

採取年月日	気温(°C)	水温(°C)	pH	DO(mg/L)	SS(mg/L)	T-N(mg/L)	NH ₄ -N(mg/L)	NO ₃ -N(mg/L)	T-P(mg/L)	PO ₄ -P(mg/L)	クロロフィルa(μg/L)	T-MC(μg/L)	MC-RR(μg/L)	MC-YR(μg/L)	MC-LR(μg/L)	植物プランクトン優占種
H11.8.26	29.0	28.2	9.3	7.8	12	1.0	<0.05	<0.05	0.18	0.11	28	5.0	<0.1	<0.1	<0.1	ミクロケステイ
H11.8.30	27.0	26.5	8.5	5.5	10	1.1	0.06	<0.05	0.21	0.14	24	0.5	3.2	<0.1	<0.1	ミクロケステイ
H11.9.2	29.5	25.5	7.5	5.6	8	1.1	0.18	0.06	0.20	0.16	10	0.8	2.7	<0.1	<0.1	ミクロケステイ
H11.9.6	25.0	25.4	7.6	7.5	11	1.2	<0.05	0.08	0.17	0.10	43	4.1	<0.1	<0.1	<0.1	ミクロケステイ
H11.9.10	27.0	25.0	7.4	7.6	9	1.0	<0.05	0.28	0.13	0.089	25	2.5	<0.1	<0.1	<0.1	ミクロケステイ
H11.9.14	25.0	24.5	7.5	7.1	7	0.90	<0.05	0.34	0.12	0.078	9.1	3.3	<0.1	<0.1	<0.1	ミクロケステイ

(対照地点名：八郎湖大瀧橋付近)

採取年月日	気温(°C)	水温(°C)	pH	DO(mg/L)	SS(mg/L)	T-N(mg/L)	NH ₄ -N(mg/L)	NO ₃ -N(mg/L)	T-P(mg/L)	PO ₄ -P(mg/L)	クロロフィルa(μg/L)	T-MC(μg/L)	MC-RR(μg/L)	MC-YR(μg/L)	MC-LR(μg/L)	植物プランクトン優占種
H11.8.26	28.0	27.2	7.6	5.9	8	1.6	0.52	0.06	0.13	0.080	32	2.3	2.3	<0.1	<0.1	
H11.8.30	28.0	26.4	8.4	11	12	1.7	<0.05	0.12	0.15	0.039	125	1.1	2.2	<0.1	<0.1	
H11.9.2	26.1	24.6	7.2	5.9	15	1.6	0.52	0.28	0.082	0.049	21	8.7	2.3	<0.1	<0.1	
H11.9.6	26.5	26.0	7.8	9.3	9	1.5	0.15	0.29	0.080	0.018	43	0.8	<0.1	<0.1	<0.1	
H11.9.10	27.0	25.7	7.2	6.0	10	1.5	0.36	0.34	0.086	0.056	10	3.0	3.2	<0.1	<0.1	
H11.9.14	25.0	24.8	7.1	6.0	12	1.2	0.24	0.38	0.068	0.043	4.5	4.2	3.1	<0.1	<0.1	

表3 平成12年度水質調査結果

(調査地点名：八郎湖湖心)

採取年月日	気温(°C)	水温(°C)	pH	DO(mg/L)	SS(mg/L)	T-N(mg/L)	NH ₄ -N(mg/L)	NO ₃ -N(mg/L)	T-P(mg/L)	PO ₄ -P(mg/L)	クロロフィルa(μg/L)	T-MC(μg/L)	MC-RR(μg/L)	MC-YR(μg/L)	MC-LR(μg/L)	植物プランクトン優占種
H12.7.24	30.5	25.1	8.4	8.4	9	0.70	<0.05	<0.05	0.053	0.007	36	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	
H12.7.27	33.5	26.5	8.6	8.7	18	0.74	<0.05	<0.05	0.045	0.009	35	0.3	<0.1	<0.1	<0.1	アナヘナ
H12.7.31	33.3	29.7	8.9	10	2	0.60	<0.05	<0.05	0.030	<0.003	18	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	アナヘナ
H12.8.2	31.0	29.5	9.2	10	2	0.69	<0.05	<0.05	0.034	0.004	27	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	アナヘナ
H12.8.9	28.8	29.5	9.3	10	12	3.3	<0.05	<0.05	0.12	0.006	96	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	アナヘナ
H12.8.16	33.5	31.0	9.3	12	10	1.2	<0.05	<0.05	0.10	0.017	63	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	アナヘナ
H12.8.21	30.8	28.6	9.4	12	10	1.4	<0.05	<0.05	0.10	0.006	82	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	アナヘナ
H12.8.25	32.8	28.0	8.8	8.2	6	0.93	<0.05	<0.05	0.10	0.041	53	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	アナヘナ
H12.8.30	32.8	29.5	9.0	9.2	25	2.6	<0.05	<0.05	0.24	0.040	109	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	アナヘナ
H12.9.4	26.8	25.7	7.9	8.0	8	0.89	0.10	<0.05	0.12	0.074	44	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	

(対照地点名：八郎湖大瀧橋付近)

採取年月日	気温(°C)	水温(°C)	pH	DO(mg/L)	SS(mg/L)	T-N(mg/L)	NH ₄ -N(mg/L)	NO ₃ -N(mg/L)	T-P(mg/L)	PO ₄ -P(mg/L)	クロロフィルa(μg/L)	T-MC(μg/L)	MC-RR(μg/L)	MC-YR(μg/L)	MC-LR(μg/L)	植物プランクトン優占種
H12.7.24	30.5	25.0	8.0	8.5	12	0.85	<0.05	0.10	0.064	0.024	31	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
H12.7.27	32.5	27.5	8.9	12	13	0.95	<0.05	0.05	0.056	0.027	43	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
H12.7.31	33.2	29.7	9.0	11	2	0.78	<0.05	<0.05	0.036	0.005	28	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	アナヘナ
H12.8.2	30.4	29.6	8.3	8.4	5	0.81	<0.05	<0.05	0.048	0.011	21	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
H12.8.9	28.5	30.4	8.3	9.6	11	0.95	<0.05	<0.05	0.079	0.023	25	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	アナヘナ
H12.8.16	32.0	29.3	8.6	9.9	7	0.56	<0.05	<0.05	0.055	0.011	23	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
H12.8.21	33.0	29.5	8.4	9.6	4	0.66	<0.05	<0.05	0.082	0.025	25	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
H12.8.25	30.8	28.5	8.1	8.6	13	1.3	<0.05	<0.05	0.14	0.056	68	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
H12.8.30	33.9	29.5	8.0	8.9	12	0.87	<0.05	<0.05	0.11	0.042	44	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
H12.9.4	25.8	25.0	7.8	8.2	15	0.84	0.09	0.11	0.098	0.056	29	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	

6. まとめ

平成10年度から12年度の3年間、環境省の委託事業として八郎湖調整池（湖心）において、アオコ形成藻類及びアオコ毒素マイクロシスチンの環境動態調査を実施したが、その結果は以下のとおりである。

各年度とも肉眼でアオコの発生が観察され、アオコ形成プランクトンの優占種は、10年度及び12年度は藍藻類のアナベナ属で、11年度はマイクロキステイス属であった。全マイクロシスチン濃度は、10年度 $0.1 \sim 3.2 \mu\text{g/L}$ 、11年度 $0.5 \sim 5.0 \mu\text{g/L}$ 、12年度 $0.1 \sim 0.3 \mu\text{g/L}$ で、マイクロシスチン-RR、-YR、-LRの各異性体濃度は、11年度に-RRが2回検出（ $2.7 \mu\text{g/L}$ 、 $3.2 \mu\text{g/L}$ ）以外はいずれも $0.1 \mu\text{g/L}$ 未満であった。アオコ発生時には、pH、DO、T-N、T-P、クロロフィルaに濃度の上昇が見られる。植物プランクトンの増殖に係るN/P比については、平年が9前後であるのに対し、アオコ形成プランクトンの優占種がアナベナ属であった平成10年度及び12年度はそれぞれ15、13であり、マイクロキステイス属が優占種であった11年度は6で、アオコ形成プランクトンの優占種によって大きな違いが見られた。マイクロシスチンと水質項目との相関については、マイクロシスチンが低濃度であるため、認められなかった。

参考文献

- 1) 秋田県：平成10年版環境白書（1998）
- 2) 土屋悦輝，渡辺真利代：環境中のマイクロシスチンのディスク型固相による抽出，衛生化学，43（3），190-196（1997）
- 3) 日本薬学会：日本薬学会第117年会，公衆衛生協議会資料（1997）
- 4) Tomoharu Sano, Fujio Shiraishi, and Kunimitsu Kaya: A method for microdetermination of total microcystin content in waterblooms of cyanobacteria (Blue-Green Algae), Intern. J. Environ. Anal. Chem., 49, 163 - 170 (1992)
- 5) 日本工業標準調査会：工場排水試験方法 JIS-K0102（1998）
- 6) 日本気象協会：海洋観測指針（気象庁編）（1990）
- 7) 秋田地方気象台：秋田県気象月報，平成10年9月（1998）
- 8) 秋田地方気象台：秋田県気象月報，平成11年8～9月（1999）
- 9) 秋田地方気象台：秋田県気象月報，平成12年7～9月（2000）

間欠式空気揚水筒周辺の水質・底質調査（平成6～12年度）

佐藤信也・吉田昇・珍田尚俊・片野登*・加藤潤**・渡辺寿***

要旨

八郎潟干拓地西部承水路の間欠式空気揚水筒設置水域で平成6年度～平成12年度に行った水質・底質調査の結果を解析したところ、設置地点では明らかな攪拌効果が認められ、水平距離約100 m 以内の水域で攪拌による水質の平均化が認められた。水循環の原動力である気泡による酸素供給量を酸素拡散モデルにより試算すると、気泡による溶存酸素濃度の増加は小さいことが確認された。

1. はじめに

秋田県は、八郎湖で最も汚濁が進行している西部承水路の浄化を計り、八郎湖の水質浄化対策の基礎資料を得るため、間欠式空気揚水筒（商品名レクリフター。以下「揚水筒」という。）を平成6年度及び平成8年度に各1基設置した。当所は、1号機設置前の平成6年6月からこの水域で水質調査を月1回、底質調査を年1～2回行ってきた。今回の報告は、平成6年度から平成12年度の調査に関するものである。

2. 揚水筒の仕様

揚水筒は、図1のように湖底に設置されており、陸上に設置されたコンプレッサーから送られる空気を下部の空気室に貯留した後に一気に放出し、空気が整流筒を通じて浮上する際に上方への水の流れができることを利用して、水を循環させようとするものである。基本的な仕様は2基とも等しく、表1のとおりである。

表1 揚水筒の仕様

揚水筒No.1	
設置時期	平成6年11月
揚水能力	17,160 m ³ /日
空気室容量	100 ℓ
空気圧縮機	7.5KW 840ℓ/分 9.5Kgf/cm ²
材 質	FRP, 耐衝撃塩ビ
揚水筒No.2	
設置時期	平成8年10月
その他の仕様	No.1に同じ

3. 調査方法

3.1 対象水域の概要

揚水筒が設置されている西部承水路は、八郎潟干拓により西側に残った水面であり、図2の位置にある。水路の北端及び南端はポンプ場での水面と仕切られている。西部承水路から中央干拓地への取水量は平成12年の実績で、農業用水のかんがい期には約130万m³/日、非かんがい期には約30万m³/日であり、一定水位を保つために北端の浜口機場から東部承水路の水が供給され、南端の南部排水機場から調整池の水が供給される。南部排水機場では取水口の近くに中央干拓地の幹線排水路の排水口があるため、

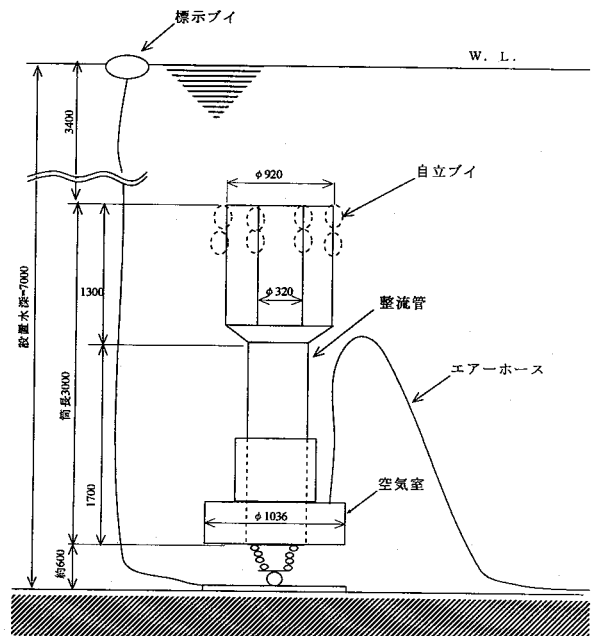


図1 揚水筒外形図

* 現秋田県立大学

** 現秋田県北部流域下水道事務所

*** 現秋田県水産振興センター

調整池より有機物、栄養塩類の濃度の高い水が混入して西部承水路に供給されることがある。揚水筒は、図3に示すように、西部承水路の北端寄りにある五明光橋の南北2ヶ所に設置されている。図4にその概念図を示す。設置地点付近は水路の幅が約450mと広く平均的な水深は約5mで、設置位置は水深約7mの最深部である。水路は橋の部分では幅が約30mに

狭まっており、水深も2m程度と浅い。各年度の調査地点は表2のとおりである。なお、St.6はバックグラウンドとして継続的に利用した地点で、水深約6mである。また、St.4は平成6年（1994年）及び平成7年（1995年）はNo.1揚水筒中心から東に約70mの位置にあったが、その後、図の位置に移設された。

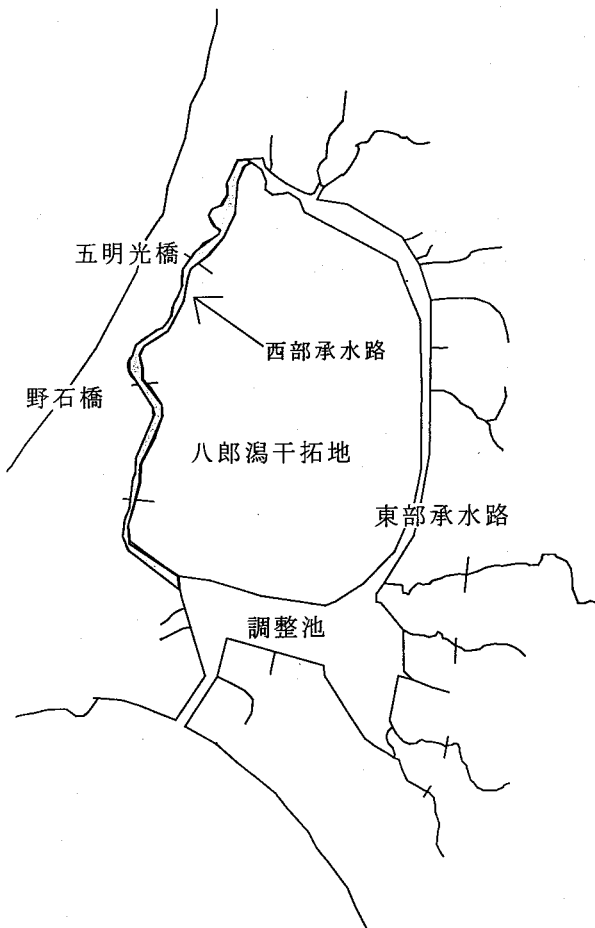


図2 西部承水路位置図

表2 各年度の水質調査地点

調査地点	年度(平成)						
	6	7	8	9	10	11	12
St1	◎	◎	○	○			
St2	◎	◎	◎	◎			
St3	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
St4	◎	◎	◎	◎			
St5	◎	○					
St6		◎	◎	◎	◎	◎	◎
St7			○	○			
St8			◎	◎	◎	◎	◎
St9			◎	◎	○		

凡例 ◎ 水質・底質調査
○ 水質調査のみ

3.2 揚水筒の稼働状況

揚水筒は12月～3月の冬季間は稼働を休止させ、4

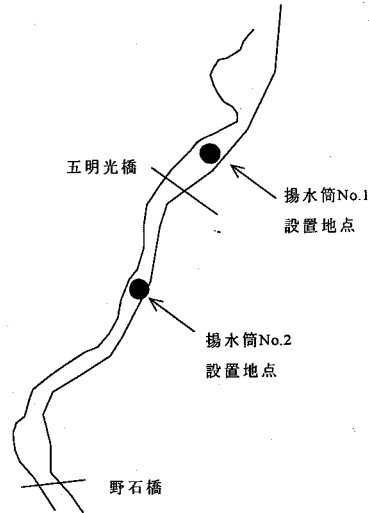


図3 揚水筒設置地点

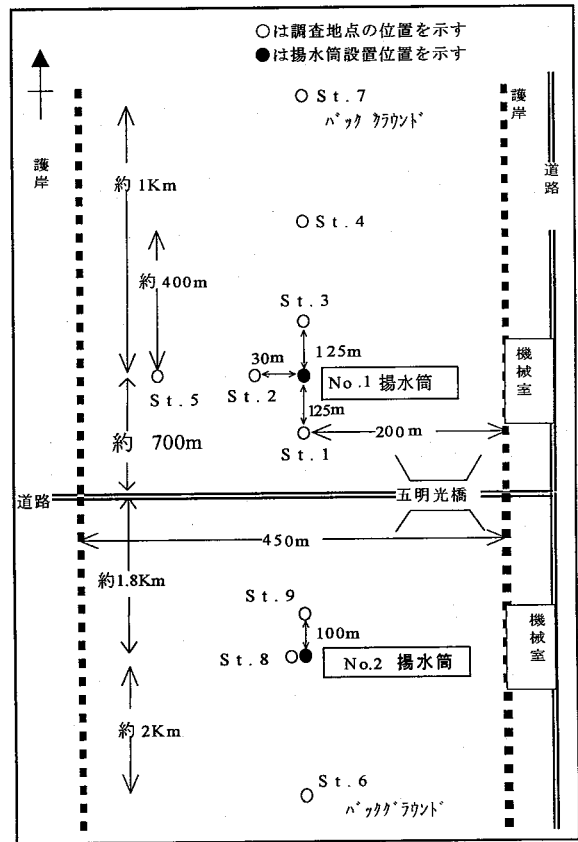


図4 調査地点概念図

月～11月に稼働させ、稼働期間中に調査を行った。ただし、平成6年については、6月～12月に調査を行

った。その年最初の調査時には、揚水筒が休止した状態でサンプリングなど調査を行い、調査後に揚水筒を始動させ、その年最後の調査後に揚水筒を停止させた。

データ解析時には、平成6年については、揚水筒No.1設置前後で区分し、その後は、毎年4月のデータを揚水筒稼働前のデータ、5月以降のデータを稼働後のデータとして処理している。

3.3 調査項目

調査は船上から行い、調査水深は、当初は1m間隔であったが、平成8年以降は0 m, 3 m, 5 mの3層とした。底質調査は、平成8年までは年2回その後は年1回であり、水質調査と併せて行った。

調査項目は、表3のとおりである。測定方法は、公共用水域の測定方法に従った。

表3 調査項目

水質調査項目
気温、水温、導電率、透明度、透視度、色相、pH、DO、BOD、COD、SS、NH ₄ ⁺ -N、NO ₂ ⁻ -N、NO ₃ ⁻ -N、T-N、PO ₄ ⁻ -P、T-P、クロロフィルa、TOC、Cl ⁻ 、Na ⁺ 、K ⁺ 、Ca ²⁺ 、Mg ²⁺ 、SiO ₂ (溶解性)、SO ₄ ²⁻ 、T-Fe、T-Mn
底質調査項目
(含有量試験) COD、T-N、T-P、Na ⁺ 、K ⁺ 、Ca ²⁺ 、Mg ²⁺ 、T-Fe、T-Mn
(溶出試験) COD、Cl、Na ⁺ 、K ⁺ 、Ca ²⁺ 、Mg ²⁺ 、NH ₄ ⁺ -N、PO ₄ ⁻ -P、SO ₄ ²⁻ 、T-Fe、T-Mn

4. 水質調査結果

4.1 経年変化

長期間継続したデータが得られている調査地点St.3, St.6, St.8の水深0m, 3m, 5mにおける主な項目の年間平均濃度を図7, 図8に示す。St.6は、バックグラウンドであり、St.3, St.8はそれぞれ揚水筒No.1, No.2に近いポイントである。

水温は、平成9年('97年)と平成11年('99年)は夏季の気温の影響で高い。平成6年('94年)が低いのは、この年の調査期間が6~12月で、平成7年('95年)以降の調査期間4~11月に比べて気温の低い12月を含むためである。表層と下層の水温差は小さく、経年的な変化はない。

DOについては、平成9年と平成11年の特にSt.3の上層と下層の差が拡大する傾向があるが、これは平均水温が高いためと思われる。

COD, T-N, T-P, クロロフィルa, TOCについては、平成6年から平成10年('98年)までは微増か横ばいであるが、平成11年から平成12年(2000年)に増加する傾向がある。これは、バックグラウンドとして設定した調査地点St.6において最も顕著であり、その次にSt.8の増加傾向が大きく、St.3は上昇幅が最も小さい。このSt.6>St.8>St.3の関係は、南から北への順序であり、南部排水機場からの用水供給との関連が示唆される。また、St.6はバックグラウンドであることから、このような変化は、西部承水路全体の水質特性と考えられる。

また、西部承水路から中央干拓地への取水量を図5に示す⁷⁾。実際には水路両岸の干拓地から農業用水が取水されるが、中央干拓地側の取水量が圧倒的に多いので、これが西部承水路における流量の目安となる。中央干拓地への取水量は、平成6年以降、徐々に増加し平成12年には平成6年比12%の増加となっている。この増加曲線とCOD等の濃度の変化の傾向が類似することは、西部承水路に供給される水の質との関連を示唆するものである。西部承水路への水の供給は、水位により管理されており、水位が一定となるように南北両端のポンプ場から取水に見合った量の水が供給される。

気温については、平成6年と平成11年は、図6に示すように夏季に気温の高い日が多く⁸⁾、特に平成11年は調整池においてもアオコが高濃度に発生した年であった。

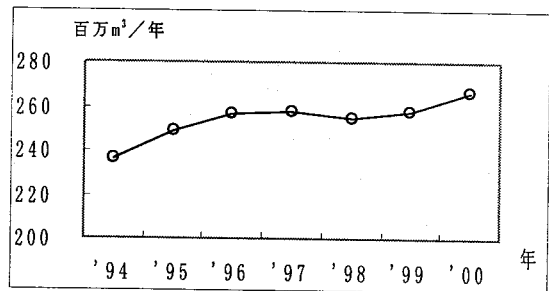


図5 西部承水路から中央干拓地への取水量

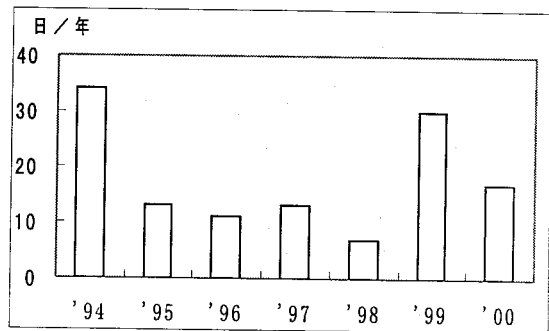


図6 平均気温25°C以上の日数 (大潟観測所)

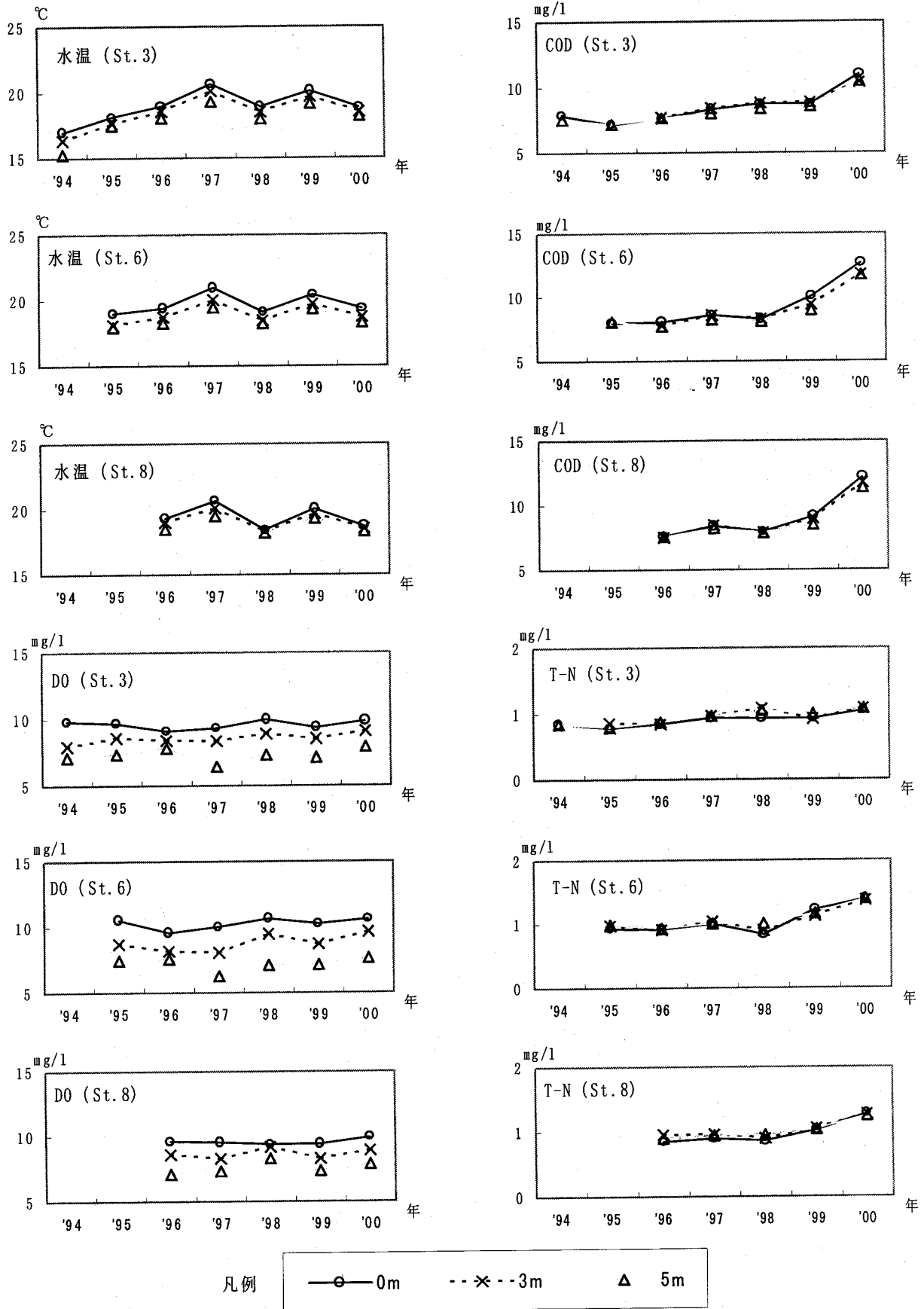


図7 St.3,6,8における各層の水溫, DO, COD, T-Nの経年変化
 各年の数値は, 調査期間(通常4月~11月)の測定値の平均値である。

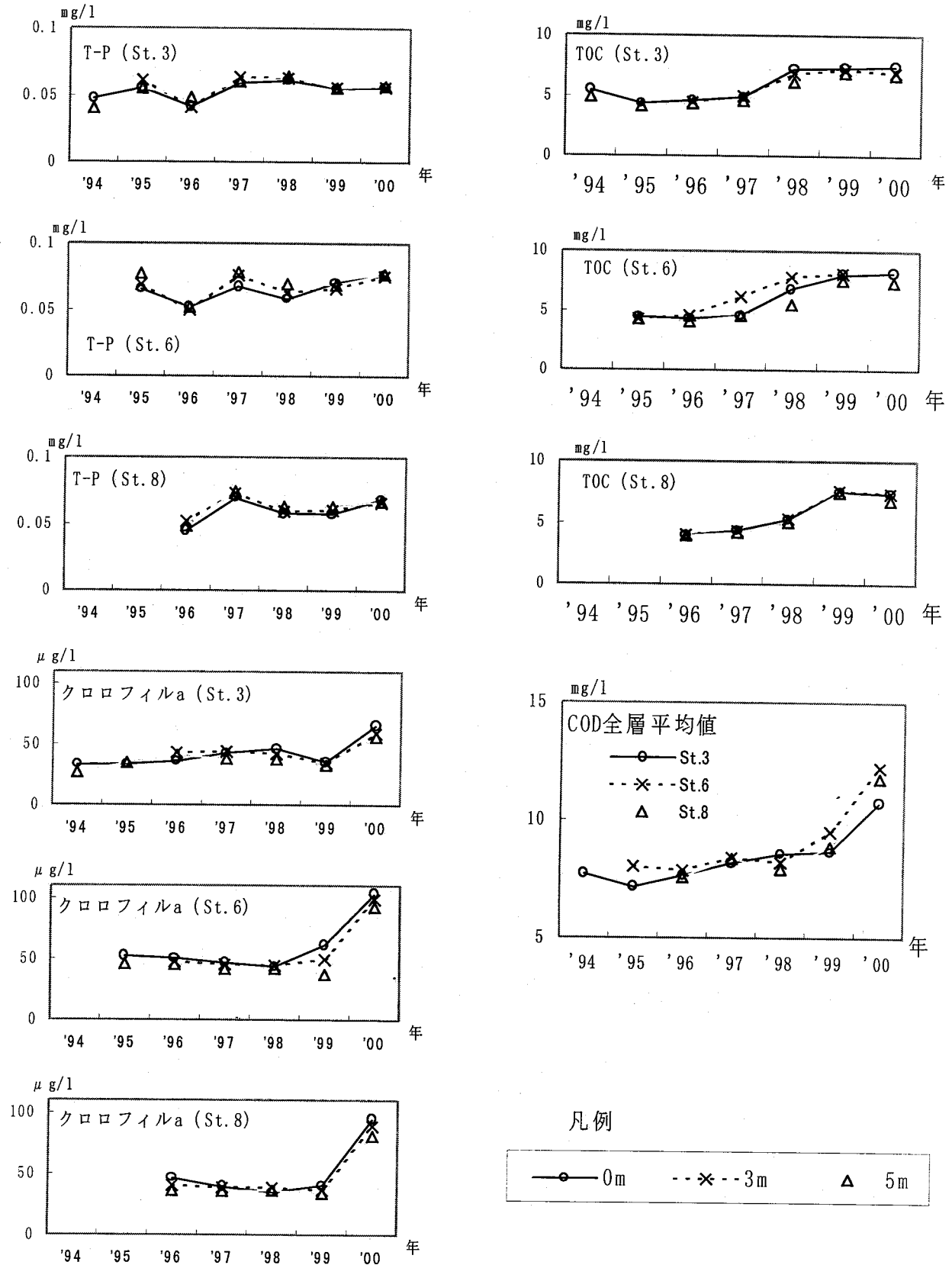


図8 St.3,6,8における各層のT-P, クロロフィルa, TOC, COD全層平均値の経年変化

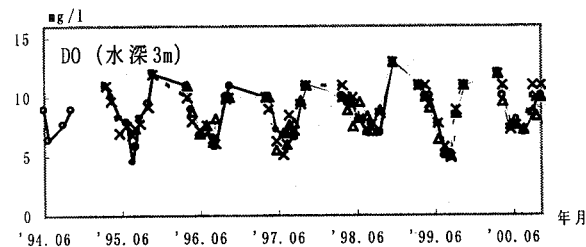
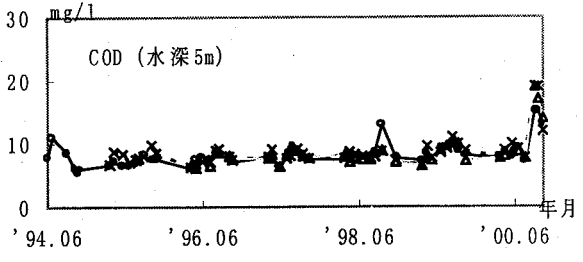
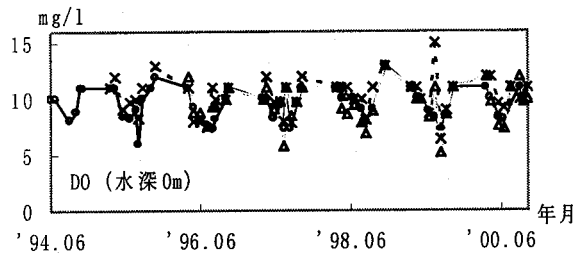
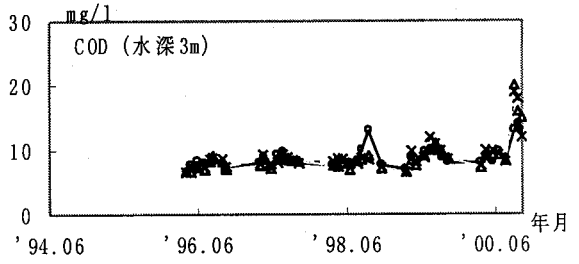
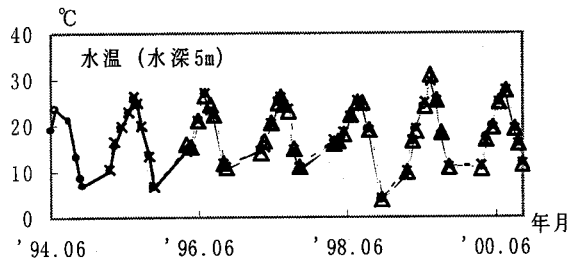
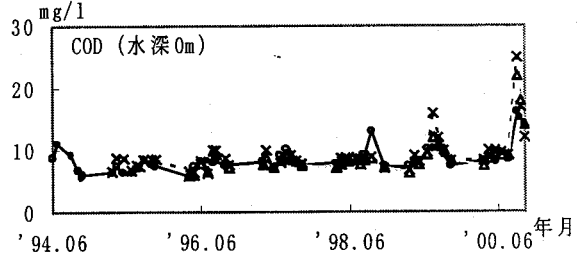
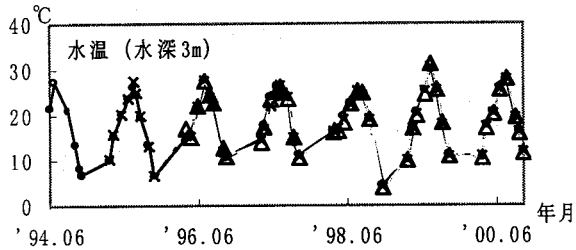
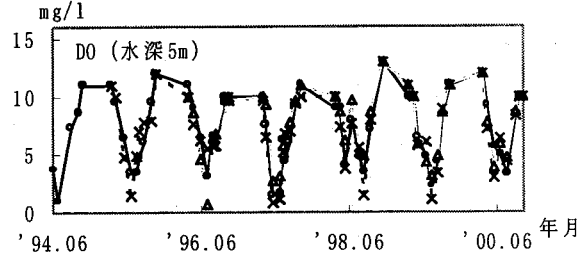
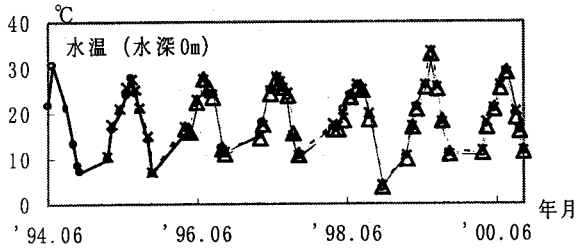
各年の数値は、調査期間（通常4月～11月）の測定値の平均値である。

COD全層平均値は、水深0mと5mの平均値。St.8のみ水深0m, 3m及び5mの平均値。

4.2 経月変化

表層、水深3m及び水深5mの各層毎の水質の月ごとのデータは図9、図10のとおりである。地点によ

る水温の差は小さい。DOは夏季に低下するが、水深5m層の低下は表層や水深3m層と比べて大きい。



凡例

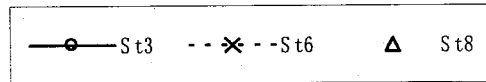


図9 水深0m, 3m, 5mにおける各地点の水温, DO, CODの経月変化

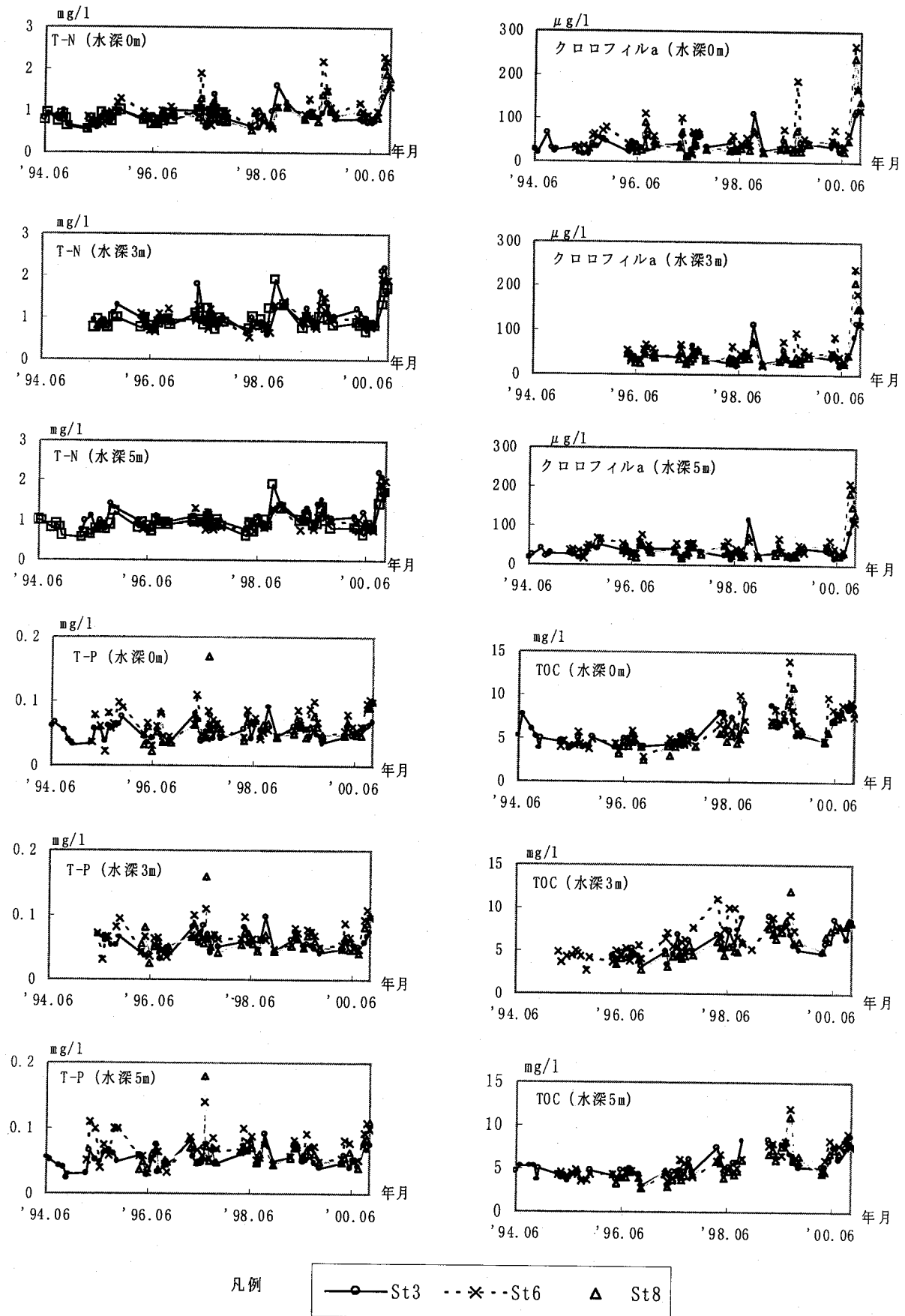


図10 水深0m, 3m, 5mにおける各地点のT-N, T-P, クロロフィルa, TOCの経月変化

4.3 項目間の相関

各項目のすべてのデータについて相関係数を求めると表4のとおりである。無機の塩類と導電率との関係、珪藻類の消長と関係するSiO₂とBOD, COD, クロロフィルaの関係が見られる。

表4 項目間の相関

相関係数	相関のある項目の組み合わせ
+0.9≦	気温-水温
+0.8≦	導電率-Na ⁺ , 導電率-Cl ⁻ , Na-Cl ⁻
+0.7≦	COD-(クロロフィルa, SiO ₂), クロロフィルa-SiO ₂ , 導電率-(Mg ²⁺ , SO ₄ ²⁻), (pH, Mg ²⁺)-BOD, Na ⁺ -(Ca ²⁺ , SO ₄ ²⁻), Ca ²⁺ -SO ₄ ²⁻
-0.7≧	BOD-SiO ₂

注) A-(B,C)とは、B,CともにAとの相関があることを示す。

4.4 揚水筒の効果の解析

揚水筒の効果の評価に当たって、①揚水筒設置前後あるいは稼働前後の水質等の変化、②水平方向及び鉛直方向の水質等の変化、の2点に着目した。解析の対象としては、調査項目、調査地点（平面配置）、水深、時間の4要素となる。そこで、「地点間有意差の検定」として調査項目及び水深を固定して、調査地点と時間で2元配置したデータについて「繰り返しのない二元配置（測定時期、地点）の分散分析（有意水準0.05）」を行う。また、「層間有意差の検定」として調査項目及び地点を固定して、水深と時間で2元配置したデータについて同様の解析を行う。ただし、水質は時間変動するものなので、時間変動について検定の結果が有意と判定されるのは自然と考える。また、湧水、揚水、排水その他、現在は把握していない要因により水質が時間空間的に変動する可能性もあるので、揚水筒稼働前の状況をチェックする必要がある。

そこで、まず、揚水筒稼働前（休止期間中を含む。）のデータについて、地点間有意差の検定及び層間有意差の検定を行って特性を把握する。さらに、揚水筒の稼働中のデータについて同様に検定を行い、稼働前後の違いを評価する、という方法で解析することとした。なお、毎年4月の調査については、揚

水筒が休止の状態で行ったものなので、稼働前のデータとして処理している。

4.5 稼働前の地点間、層間有意差

揚水筒稼働前の状態把握のために行った地点間有意差の検定結果は、表5のとおりである。揚水筒No.1の関係地点では地点によってTOCに有意差が見られる。St.4はSt.1,2,3より北寄りにあり、浜口機場から比較的濃度の低い東部承水路の水が供給される影響を反映していると考えられる。

揚水筒No.2の関係では、St.6がSt.8と比べてCOD, T-N, クロロフィルaが高い。St.6はバックグラウンドなので、付近の流入水や湧水の影響による濃度変化も考えられるが、最南端の地点なので南部排水機場からの供給水の影響も考えられる。

稼働前の層間有意差の検定結果は表6のとおりである。表層と下層の水温差が夏季に拡大する傾向があるが、これと併せて全層的に水温が上昇し、微生物活動が活発になり、酸素消費が増加するために下層のDOが低下する。各地点の層間有意差については、その地点の特性として、揚水筒稼働後も同様であろうと推測することにする。

4.6 地点間有意差の相違

揚水筒稼働中の地点間有意差の検定を行い、稼働前の検定結果と比較して違いのある部分を取り出すと表7のようになる。揚水筒に最も近いSt.2及びSt.8の表層で水温が低くなる傾向が認められる。また、揚水筒No.1直近のSt.2の表層ではDOが他の地点より低く、揚水筒No.2直近のSt.8の下層では他地点よりDOが高い。また、St.8の表層ではCOD, TOCが他地点より高く、逆に下層ではT-N, T-P, TOCが低くなる傾向が認められる。

4.7 層間有意差の相違

揚水筒稼働中の層間有意差の検定を行い、稼働前の検定結果と異なる部分を抽出すると、表8のようになる。揚水筒No.2から100m離れたSt.9において、揚水筒が稼働すると上下層の水温差が小さくなる傾向が認められる。その他の項目、その他の地点についても稼働前後の検定結果に変化が認められるが、稼働前は分散が大きかったため有意差が認められなかったが、稼働中は平均化により分散が小さくなり、有意差があると判断される場合が多いと考えられる。

表5 揚水筒稼働前の地点間有意差

項目	水深(m)	地点	揚水筒	有意差の内容
COD	0,3m	St.6,8	No.2	St.8に対してSt.6は平均値で2.5高い。
T-N	0m	St.6,8	No.2	St.8に対してSt.6は平均値で0.1高い。
クロロフィルa	5m	St.6,8	No.2	St.8に対してSt.6は平均値で7高い。
TOC	0m	St.1,2,3,4	No.1	St.1>2,3>4で差は最大2.4
	0m	St.6,7,8,9	No.2	St.6,7<8,9で差は0.3~0.5
	5m	St.1,2,3	No.1	St.1>2>3で最大差は1.0

表6 揚水筒稼働前の層間有意差の検定結果

項目	地点	水深	揚水筒	有意差の内容
水温	St.1,6,8,	0~5m	No.1,2	夏季に表層と下層の温度差が大きくなることがある。 (平成6年, 11年)
DO	St.1,6,8	0~5m	No.1,2	表層と下層の差がある。平均2, 夏季に8程度。
COD	St.1	0,2,5m	No.1	表層>下層。層差平均0.3
T-N	St.2	0,2,5m	No.1	表層<下層。層差平均0.7
T-P	St.6	0,3,5m	No.2	表層<下層。層差平均0.008
クロロフィルa	St.3	0,2,5m	No.1	表層>下層。層差平均0.7
TOC	St.1	0,2,5m	No.1	表層>下層。層差平均1.5
	St.8	0,3,5m	No.2	中層>他層。層差平均0.5

表7 揚水筒稼働前後の地点間有意差の相違

項目	水深	地点	揚水筒	相違内容
水温	0m	St.1,2,3,4	No.1	稼働後にSt.1,3,4に対してSt.2が平均値で0.3℃低い。
	0m	St.6,8,9	No.2	稼働後にSt.8がSt.6,9に対して平均値で0.4~0.5℃低い。
DO	0m	St.1,2,3,4	No.1	稼働後にSt.1,3,4に対してSt.2は平均値で0.8~0.9低い。
	5m	St.6,8	No.2	稼働後にSt.6に対してSt.8は平均値で0.7高い。
COD	0m	St.1,2,3,4	No.1	稼働後にSt.3,4に対してSt.1,2が平均値で0.4~0.5高い。
	0,3m	St.6,8	No.2	稼働前にSt.8に対してSt.6が高い(表層で平均値2.5, 中層で同0.3)が, 稼働後には有意差なしとなる。
T-N	5m	St.6,8	No.2	稼働後にSt.6に対してSt.8は平均値で0.1低い。
T-P	5m	St.6,8	No.2	稼働後にSt.6に対してSt.8は平均値で0.006低い。
クロロフィルa	3m	St.6,8	No.2	稼働後にSt.6に対してSt.8は平均値で10低い。
TOC	0m	St.6,7,8,9	No.2	稼働前St.6,7<8,9差0.3~0.5 稼働後は有意差なし。
	3m	St.6,8	No.2	稼働後にSt.6>St.8差1.6(稼働前は同差0.8で有意差なし)
	5m	St.6,8	No.2	稼働後にSt.6>St.8差0.3(稼働前は同差0.2で有意差なし)

表8 揚水筒稼働前後の層間有意差の相違

項目	地点	水深(m)	揚水筒	相違内容
水温	St.3	0,1,2,3,4,5	No.1	稼働後の上層のデータの分散が稼働前より小さくなり、その結果、上層下層の平均値の差は0.6℃と小さいが、有意差があると判定される。
	St.4	0,2	No.1	同上
	St.9	0,3	No.2	稼働前に層間有意差（平均値で0.7℃）があるが、稼働後には差が認められない。
DO	St.3	0,3,5	No.1	稼働後に上層下層の差が2.6で有意。稼働前は3.2だが分散が大きいため有意でない。
	St.9	0,3	No.2	稼働後に上層下層の差が0.9で有意。稼働前も差は同じだが、分散が大きいため有意とならない。
COD	St.1	0,2,5	No.1	稼働前、中層下層の差が0.8で有意だが、稼働後は有意差なし。
	St.3,4	0,2,5	No.1	稼働後に中層下層の差が0.2~0.3で有意。稼働前は差が0.4~0.5だが分散が大きいため有意でない。
	St.6,8	0,3,5	No.2	稼働後に上層が下層より高く差が0.5~0.7となる。
T-N	St.2	0,2,5	No.1	稼働前に上下層の差が0.08で有意だが、稼働後は差が0.04で有意でなくなる。
	St.4	0,2,5	No.1	稼働後に上下層差が0.09で有意となる。稼働前は0.02で有意差なし。
	St.9	0,3	No.2	稼働後に上下層差が0.2となり有意。稼働前は0.06で有意差なし。
T-P	St.6	0,3,5	No.2	稼働前に上層下層の差が0.006で有意だが、稼働後は0.005となり有意でない。
	St.8	0,3,5	No.2	稼働後に層差0.004で有意だが、稼働前は層差0.005で有意差なし。
	St.9	0,3,5	No.2	稼働後に層差0.011で有意だが、稼働前はほとんど層差がなかった。
クロロフィルa	St.1	0,2,5	No.1	層差8で有意だが、稼働前は12で有意差なし。分散が小さくなったことによる。
	St.4	0,2,5	No.1	層差6で有意だが、稼働前は層差3で有意差なし。分散は稼働後に大きくなっている。
	St.6,8	0,3,5	No.2	層差が7~11で有意だが、稼働前は層差3~5で有意差なし。
TOC	St.6	0,3,5	No.2	表層より下層が0.6低い。稼働前は層差0.4で有意差なし。

5. 底質調査結果

5.1 経年変化

ほぼ全期間継続したデータが得られているSt.3, 6, 8におけるCOD, T-N, T-Pについては増加傾向が認められるが、d-CODについては逆に減少傾向が認められ、有機性沈殿物の増加が示唆される。また、St.1,4,6のように濃度が時期的に大きく変化する場合があります。これらの地点においては湧水などの影響で底質が乱されているか、又は、堆積層厚が薄いことも考えられる。（図11, 図12）

5.2 揚水筒稼働前後の底質の有意差検定

底質は季節変動が大きくないものと仮定して、各地点で揚水筒の稼働前後で平均値の差があるかどうかを検定した。しかし、多くの地点で稼働前のデータ不足のため検定が不能であり、検定が可能なSt.6については、COD, T-N, T-P, d-CODについて稼働前後の有意差はなかった。（等分散を仮定した2標本によるt-検定。有意水準0.05 両側確率。）

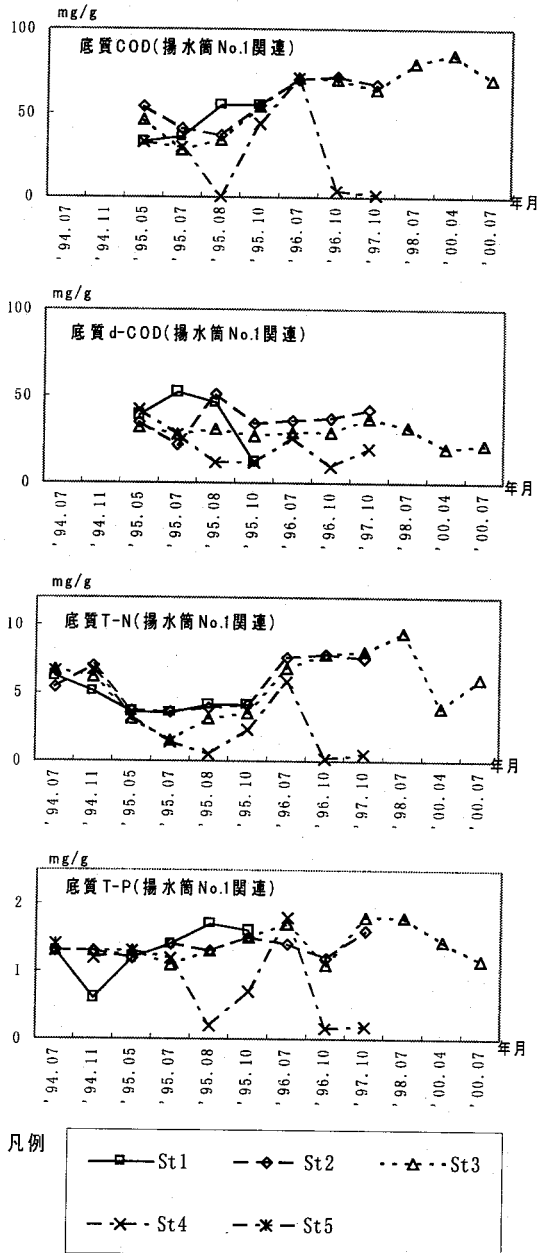


図11 底質の経年変化 (揚水筒No.1関連地点)

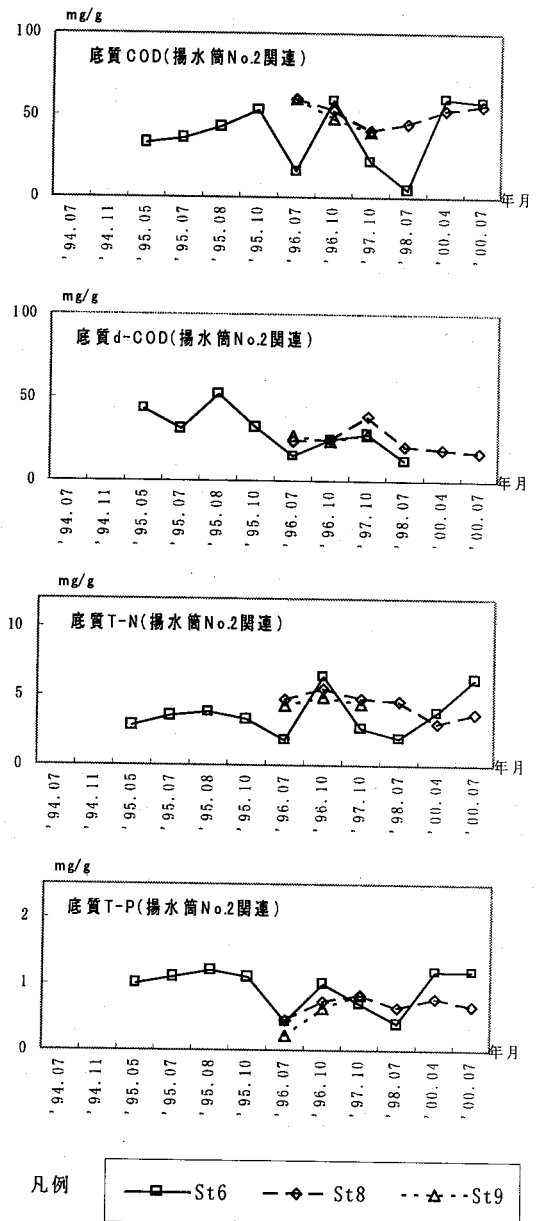


図12 底質の時間変化 (揚水筒No.2関連地点)

5.3 地点間有意差の検定

稼動前のデータ不足のため、稼動後の地点間有意差のみ検定した結果を表9に示す。(繰り返しのない2元配置の分散分析, 有意水準0.05)

St.4のみが多く項目で特異的に低い。St.4は'95年及び'96年はNo.1揚水筒の東約70mにあり, '97年以降に北寄りに移設されたので, この影響も考慮しなければならないが, 移設後も非常に低い値を示す

ことがあることから, 堆積物が少ないか, 湧水などにより堆積厚が不均一になっている, などが考えられる。また, 移設後の現地点の堆積物が少ない理由として, 最も北寄りのバックグラウンドSt.7の次に水路北端に近いので, 水質と同様に, 水路北側から比較的濃度の低い水が供給されるという西部承水路の特性を反映しているものと考えられる。

表9 揚水筒稼働後の底質の地点間検定結果で有意差のあったもの

項目	揚水筒	地点	有意差の内容
COD(含有量)	No.1	St.2,3,4	平成7年～9年ではSt.2,3の平均値56に対してSt.4は同26
d-COD(溶出)	No.1	St.2,3,4	平成7年～9年ではSt.2,3の30,36に対してSt.4は21
T-N(含有量)	No.1	St.2,3,4	平成6年～9年ではSt.2,3の5.0に対してSt.4は2.5
T-P(含有量)	No.1	St.2,3,4	平成6年～9年ではSt.2,3の1.3に対してSt.4は0.8

6. 考察

6.1 揚水筒のかくはん効果

地点間有意差の検定結果から、揚水筒設置地点近傍では、夏季に下層の低水温・低DOの水が表層まで揚水され、周囲から水が流れ込む攪拌効果が認められる。

層間有意差の検定結果によれば、揚水筒設置位置から水平距離で約100m以内の地点でも上下層の温度差が小さくなる、平均値の変化を伴わないが分散(バラツキ)が小さくなる、などの変化があり、これも攪拌による平均化の効果と考えられる。

以上のことを踏まえると、揚水筒の攪拌効果を図13のようにイメージすることができる。気泡の浮上により、下層の低DOの水が上昇し、表層に達して表層で四方に拡散しながら、大気から酸素供給を受ける。一方、揚水筒の底部では、上昇した水が移動した後に周囲の水が流れ込むが、大部分の水平に移動してくる下層の水と、中層の水の沈み込みも若干あるものと考えられる。よって、表層では揚水筒直近で下層から巻き上げられてくる低DOの水の影響でDOが低下し、揚水筒から離れるに従ってDOは次第に回復する。一方、揚水筒直近の下層では中層の比較的DOの高い水も巻き込まれて、DOは若干上昇する場合もあるものと考えられる。表層に巻き上げられた水に含まれる成分は、揚水筒の中心から周囲に拡散していくが、深さ方向にも拡散するので、距離の2乗を超える割合で減衰するものと考えられる。

6.2 揚水筒のばっ気効果

揚水筒は気泡の上昇に伴う水の攪拌効果を目的とするもので、気泡サイズが非常に大きく、溶存酸素の増加を目的とするものではない。表層のDOが通年ほぼ飽和していること、気泡が揚水筒から放出されて自由に浮上を始める水深が約3.4mと浅いため、表層から中層までの間で溶存酸素の増加は観測されなかった。下層でDOが増加した地点があり、これは攪拌効果によるものと考えられるが、揚水筒

が気泡の浮上を利用していることから、幾分か酸素供給もあるのではないかと考えるのは自然である。そこで、確認のため、これを試算すると次のようになる。

初期の溶存酸素濃度によって溶解する酸素量が決まってくるので、深さ方向の溶存酸素分布を把握する必要がある。揚水筒未稼働時の水質特性として溶存酸素濃度の水深依存性があり、夏季に著しい。これは、水温上昇に伴って微生物活動が活発化し酸素消費速度が増加するためであり、理論的には、微生物による酸素消費速度は温度の変化により指数関数的に変化することが分かっている。(付録A。また、水深とDOの関係については付録Bを参照のこと。)これで、揚水筒稼働前の深さ方向の溶存酸素濃度を推定できる。

別に、気泡の形と浮上速度を求め、先に設定した溶存酸素分布の環境の中で気泡から水へ酸素が移動する量を試算すると、気泡による酸素供給量は非常に小さいことを確認できる。(付録C参照のこと。)

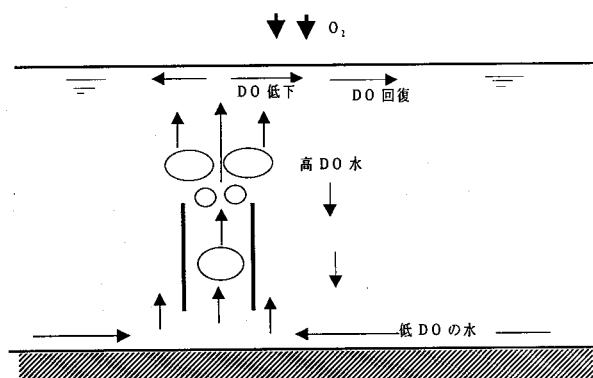


図13 揚水筒のイメージ

揚水筒により上下層が攪拌される。

参考文献

- 1)秋田県環境政策課：平成13年度レイクリフター（間欠式空気揚水筒）による水質浄化対策事業実施要領。
- 2)杉本昭典：水質汚濁，現象と防止対策，p325-343，技報堂，1974。
- 3)エッケンフェルダーJr.,W.W.オコンナー,D.J.（岩井重久訳）：廃水の生物学的処理，p77-89，コロナ社，1965。
- 4)機械設計便覧，p957-958，丸善，1992。
- 5)萩原耕一，新版BOD試験法解説，績文堂，1957。
- 6)気象月報，1994.1～2000.3，気象庁。
- 7)取水調査簿（平成6年～平成8年）及び水利使用報告（平成9年～平成12年），秋田県八郎潟基幹施設管理事務所。

付録A. BOD速度定数の温度依存性

萩原⁵⁾によれば，

k_1 ： T_1 °KにおけるBOD速度定数

k_2 ： T_2 °KにおけるBOD速度定数

とすれば，

$$k_1 = k_2 \theta^{T_1 - T_2}$$

である。ここに， $\theta = 1.47$ である。

例えば， $T_1 - T_2 = 10$ のとき

$$1.47^{10} \approx 47$$

である。つまり，10°C上昇すれば反応速度は約47倍となる。

付録B. 水深とDOの関係

川のような流れのある場合の酸素拡散理論では，深さ方向の酸素分布は一様として取り扱うのが一般的である。しかし，揚水筒の効果を試算するには必要なのは深さ方向の濃度分布である。そこで，水面から深さ方向に酸素が拡散する場合を想定して拡散方程式を立て，これを近似的に解くことにする。

まず，酸素の拡散の一般論に従って「酸素移動速度は飽和濃度と実際の酸素濃度との差の勾配に比例する」と仮定すると，

$$J = -K_1 \frac{\partial}{\partial x} \{u_s(x,t) - u(x,t)\} \quad (1)$$

である。

ここに，

J ：酸素移動速度、 $u_s(x,t)$ ： (x,t) における飽和濃度、 $u(x,t)$ ：溶存酸素濃度、 K_1 ：拡散係数。

である。

いま，深さ方向の拡散のみ考え，かつ，微生物による酸素消費を考慮すると，

$$\frac{\partial u}{\partial t} = K_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - K_1 \frac{\partial^2 u_s}{\partial x^2} - K_2 L(x,t)u \quad (2)$$

が成り立つ。ここに， $L(x,t)$ は深さ x ，時刻 t におけるBOD濃度である。

ここで，系は定常状態であり，BOD濃度は一様であり，水深による温度変化もないと仮定すれば，

$$\frac{\partial u}{\partial t} = 0, \quad L(x,t) = L_0, \quad \frac{\partial^2 u_s}{\partial x^2} = 0 \quad (3)$$

なので，方程式は

$$K_1 \frac{d^2 u}{dx^2} - K_2 L_0 u = 0, \quad (4)$$

となる。これを u について解くと，次の解を得る。

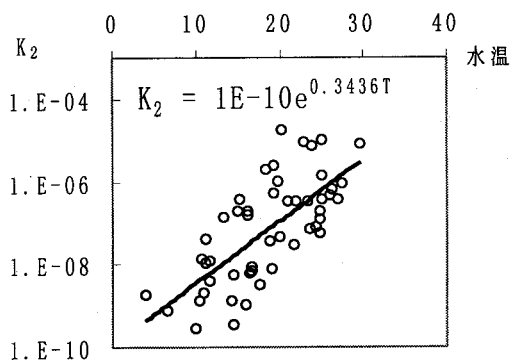
$$u(x) = u_0 \exp\left(-\sqrt{\frac{K_2 L_0}{K_1}} x\right) \quad (5)$$

ここに， $u_0 = u(0)$ ， $K_1 = D_L = 7.54 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h} = 1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{day}$ である。拡散係数 $K_1 = D_L$ （分子拡散係数）としたのは，深さ方向の拡散は，乱流の影響が少ないとみなしたものである。

脱酸素係数 K_2 は，温度に依存するが，実際の観測データから決めることにする。 K_2 は上式から次により求めることができる。

$$K_2 = \frac{K_1}{L_0} \left(\frac{1}{x} \lambda n \frac{u_0}{u} \right)^2 \quad (6)$$

バックグラウンドとして設定したSt.6の実測値を基にして K_2 を推定するが，水面では溶存酸素がほとんど飽和しており，水深3mでも溶存酸素が飽和していることが多く乱流拡散の影響があると思われるので，水深5mの平成6年～平成12年のデータを用いることにする。水温と K_2 の計算値の関係の回帰式を指数関数で求めると，図B-1のようになる。



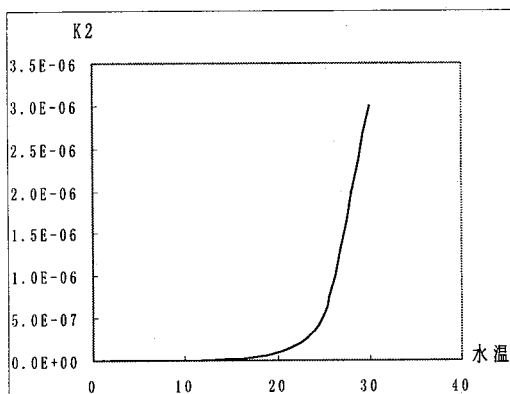
図B-1 St.6水深5mにおける水温とK₂の関係

St.6水深5mの平成6年～平成12年の水温、DO、BOD(CODから推定。)から(6)式により求めたK₂をプロットしたもの。縦軸は対数目盛である。

このグラフから、最小二乗法で一次式を求めると、水深5mで、

$$K_2 = 10^{-10} e^{0.3436T}, T: \text{水温} (^\circ\text{C}) \quad (7)$$

が得られる。式(7)のグラフは図B-2のようになり、水温が高くなると、微生物活動が急激に活発になり酸素消費速度が高まる様子を再現している。



図B-2 $K_2 = 10^{-10} e^{0.3436T}$ のグラフ

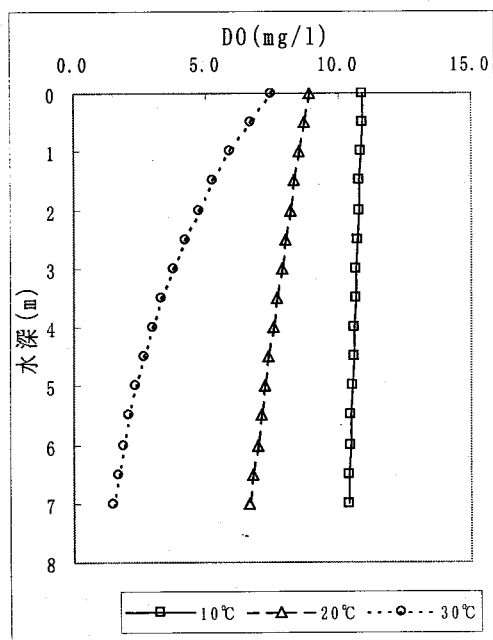
この脱酸素係数を用いて解u(x)を描くと、図B-3のように、水温が高くなるにつれて下層のDOが低くなる様子を再現できる。この後の計算では、この係数を用いることにする。K₂=3.1×10⁻⁹ (10℃), 9.6×10⁻⁸ (20℃), 5.4×10⁻⁷ (25℃), 3.0×10⁻⁶ (30℃)。

付録C. 揚水筒のばつき効果試算

C.1 液体中を上昇する気泡の速度

C.1.1 液体中を上昇する気泡に関する理論

液体中を上昇する気泡の形と速度について、表C-1³⁾及び表C-2⁴⁾の知見がある。



図B-3 溶存酸素濃度の推計値u(x)のグラフ

計算条件: L₀=3.2(BOD), K₁=1.8E-4, K₂=10⁻¹⁰ e^{0.3436T}

C.1.2 揚水筒への応用

・気泡の大きさ

後の計算で分かるように気泡の相当直径は、揚水筒の整流管の部分で約0.58m、整流管の上部で4つに分割されてから水面までは約0.4mであり、上昇速度は約1.5m/secである。レイノルズ数を求めると次のようになる。

・レイノルズ数Re

密度 ρ₁=1, 粘度 μ₁=1×10⁻⁶ kgfs/m², d_b=0.5m, 気泡の上昇速度 w_b=1.5m/secより、

$$Re_b = \rho_1 w_b d_b / \mu_1 = 7.5 \times 10^5 > 4000$$

よって表C-1、表C-2から、揚水筒で作られた気泡は、キノコ笠状の形で上昇するものと考えられる。その上昇速度は、表C-1から算出できる。

まず、空気室の水深6.4mで生成される気泡は空気室容量100%であり、整流管内を浮上する。整流管の上部(水深4.7m)までの相当半径は、水深x(m)に応じて水圧の変化を考慮すると、次のように表わせる。

$$r_b(x) = 0.34(1 + x/10)^{-1/3} \quad (8)$$

この区間の平均半径は0.29m、平均浮上速度は1.65m/secである。

また、整流管上部で気泡は4つに分割されてそれぞれ浮上することになるので、水深4.7mから水面ま

での相当半径は、次式で表わすことができる。

$$r_b(x) = 0.21(1 + x/10)^{-1/3} \quad (9)$$

この区間の平均半径は0.20m、平均速度は1.36m/secである。

C.2 揚水筒による酸素供給量の試算

C.2.1 気泡ばっ気による酸素供給量

気泡ばっ気に関する酸素移動の理論では、

m : 酸素移動量, K_L : 液膜係数, A : 接触面積,

C_s : 溶存酸素飽和濃度, C : 溶存酸素濃度,

t : 時間

として、酸素移動速度を次式により表す。

$$dm/dt = K_L A (C_s - C) \quad (10)$$

また、溶存酸素飽和濃度については次式の関係が分かっている。

$$C_s = 475/(33.5 + T), \quad T: \text{水温 } (^{\circ}\text{C}) \quad (11)$$

気泡と接触する前の初期状態の溶存酸素濃度の分布は、式(5)により表されるものとし、表層における溶存酸素濃度は飽和しているものとして、(5)式で $u \rightarrow C$, $u_0 \rightarrow C_s$ と書き換え、式(11)とともに式(10)に代入すると、

$$dm/dt = K_L A * 475/(33.5 + T) [1 - \exp\{-(-L_0 K_2 / K_1)^{1/2} x\}] \quad (12)$$

ここに、

$$K_1 : \text{拡散係数} = D_L = 7.54 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{h} \\ = 1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{day},$$

K_2 : 脱酸素係数 $= 10^{-1.0} \exp(0.3436T)$, L_0 : BOD である。

また、 K_L については、エッケンフェルダール³⁾の調査データ(同文献p86図3.3)を用いて得られる次の関係式を利用する。

$$K_L = 85.446 \text{ Re}^{0.56541} D_L / (d_b x^{1/3}) \quad (13)$$

表C-1 液体中を上昇する気泡の形状と速度

気泡の大きさ	形状	速度
直径 $d_b = 1 \sim 1.5 \text{ mm}$ 又は $\text{Re}_b < 400$	ほぼ球形	$w_b = (1/18)(d_b^2 \rho_1 g / \mu_1)(1 - \rho_g / \rho_1)$
$d_b = 8 \sim 10 \text{ mm}$ 又は $400 \leq \text{Re}_b \leq 5000$	偏平な回転楕円体形	$2 \leq \text{Re}_b \leq 4.02 G^{-0.214}$ のとき、ジグザグ又は螺旋状に上昇。 $w_b = 0.33 g^{0.76} (\rho_1 / \mu_1)^{0.52} r_b^{1.28}$ $4.02 G^{-0.214} \leq \text{Re}_b \leq 3.10 G^{-0.25}$ のとき、螺旋状に上昇。 $w_b = 1.35 (\sigma / \rho_1 r_b)^{0.50}$
$d_b > 8 \sim 10 \text{ mm}$	キノコ笠形	鉛直に上昇する。 $w_b = 0.97 (r_b g)^{0.50}$

D_L , $d_b = 2r_b$, Re は与えられているから、

$$K_L = C_K (1 + x/10)^{1/3} x^{-1/3} \quad (14)$$

$$C_K = 5.51 \times 10^{-4} \quad (x = 4.7 \sim 6.4 \text{ m})$$

$$C_K = 8.92 \times 10^{-4} \quad (x = 0 \sim 4.7 \text{ m})$$

さらに、気泡を球形と見立てて気泡と水との接触面積Aを水深 x の関数で表すと、

$$A = C_A (1 + x/10)^{-2/3} \quad (15)$$

$$C_A = 1.45 \quad (x = 4.7 \sim 6.4 \text{ m})$$

$$C_A = 2.22 \quad (x = 0 \sim 4.7 \text{ m})$$

後のために、気泡の上昇速度の表式から dx/dt を求めておく。

$$w_b = -dx/dt = C_w (1 + x/10)^{-1/6}$$

$$C_w = 1.78 \quad (x = 4.7 \sim 6.4 \text{ m}) \quad (16)$$

$$C_w = 1.40 \quad (x = 0 \sim 4.7 \text{ m})$$

J : 酸素移動速度、 $u_1(x, t)$: (x, t) における飽和濃度、 $u(x, t)$: 溶存酸素濃度、 K_1 : 拡散係数。

さて、水深 d_1 から d_2 まで気泡が上昇する間に気泡が水に供給する酸素量は式(17)で与えられ、これを数値計算すると、表C-3のように1回の気泡の上昇によって供給される酸素量が得られる。

$$M_{s_1}^{d_2}(T) = \int_{d_1}^{d_2} \frac{dm}{dt} dt = \int_{d_1}^{d_2} \frac{dm}{dt} \frac{dt}{dx} dx = \\ - \int_{d_1}^{d_2} K_L A C_s \left\{ 1 - \exp(-\sqrt{K_2 L_0 / K_1} x) \right\} / w_b dx = \\ \frac{0.129}{33.5 + T} \int_{d_2}^{d_1} x^{-1/3} \left\{ 1 - \exp(-\sqrt{K_2 L_0 / K_1} x) \right\} \left(1 + \frac{x}{10} \right)^{-1/6} dx. \quad (17)$$

ここに,

ρ_l : 液体の密度, μ_l : 液体の粘度, σ : 表面張力, d_b : 気泡の直径 (相当直径), ρ_g : 気泡の密度

Re_b : 気泡の周りのレイノルズ数 $Re_b = \rho_l w_b d_b / \mu_l$,

$G = We^3 / (Re_b^4 F_r^2)$

$We = \rho_l w_b^2 d_b / \sigma$: ウエーバー数, $F_r = w_b / (gd_b)^{1/2}$: フルード数

表C-2 気泡の形と動き

Re	形状	動き
≤ 300	球状	剛性球体のように動く。上昇の軌跡は直線状又は螺旋状。
300~4000	楕円形	揺動しながら直線的に上昇する。
>4000	球形の帽子状	

表C-3 1回の気泡上昇による酸素供給量試算結果

(単位: g O₂/回)

水深区間(m)	水温20℃	水温30℃
6.4~0	0.00444	0.0157
6.4~6	0.000181	0.000513
6~5	0.000427	0.00127
5~4	0.000643	0.00204
4~3	0.00106	0.00366
3~2	0.000872	0.00327
2~1	0.000640	0.00261
1~0	0.000304	0.00135

C.2.2 揚水筒による酸素供給量

機械仕様 (コンプレッサー能力840ℓ/分, 空気室容量100ℓ) より, ほぼ7秒間隔で気泡が放出されることになる。1日に12,343回となる。気泡が6.4m上昇するものと仮定して, 表C-3から1日の酸素供給量を求めると, 表C-4のとおりである。

表C-4 揚水筒による1日当り酸素供給量試算結果

水温(℃)	1回の酸素供給量(mg/回)	1日の酸素供給量(g/日)
20	4.44	54.8
30	15.7	194

C.2.3 溶存酸素濃度への影響

揚水筒の揚水能力は17,160m³/日なので, 1日に深さ7m, 半径28mの円筒形の領域の水を1回循環させる能力があることになる。揚水筒から供給される全酸素量が消費されずに, 設定した領域内に均一に分散されると仮定すれば, 揚水筒による溶存酸素濃度の増加分は, 表C-5のように推測される。

表C-5 揚水筒による酸素濃度増加分の試算結果

(単位: mg O₂/l)

水温(℃)	円筒形の影響領域の半径(m)					
	28	20	10	5	3	1
20	0.0032	0.0062	0.025	0.10	0.28	2.5
30	0.011	0.022	0.088	0.35	0.98	8.8