

茨戸川における水収支と熱収支

Water Balance and Heat Balance in the Barato River

(株) シン技術コンサル	○正員	加藤 晃司(Koji Kato)
(独) 北海道開発土木研究所	正員	中津川 誠(Makoto Nakatsugawa)
(独) 北海道開発土木研究所	正員	高田 賢一(Ken-ichi Takada)

1. はじめに

札幌市の北部に位置する茨戸川は、昭和初期の石狩川のショートカットによって形成された水域である。茨戸川は閉鎖性が高く、流れが停滞することや周辺からの汚濁負荷の流入などにより富栄養化現象が発現してきた。このような富栄養化傾向を改善するためには、水質の空間構造や形成要因を把握する必要がある。

そこで本研究では、地形的・水理的な特徴により区分されている上部湖盆、中部湖盆、下部湖盆ごとに水収支、熱収支を推算した。茨戸川は閉鎖性の強い典型的な低平地水域であり、水収支、熱収支は、都市下水道を経由した複雑な流出過程を考慮して推算する必要がある。ここで得られた算出結果から湖盆別の水質形成に関わる特徴を把握し、その結果を水質浄化・水環境保全の基礎資料として利用することを目的とする。



図-1 茨戸川位置図

2. 水収支の考え方と特徴

茨戸川は、図-1 に示すように上部湖盆、中部湖盆、下部湖盆に分類され、主要な流入河川である創成川、伏籠川、発寒川が下部湖盆に注いでいる。流出は、平常時に志美運河を通しての石狩川への流出と洪水時に石狩放水路を通しての海への流出がある。

また、茨戸川には図-2 に示す札幌市と石狩市の処理区から下水処理水が流入している。その処理区は表-1 に示すように、159.4km²の流域面積のうち約 45%（合流式 42%、分流式 3%）を占める。ちなみに、下水道の普及率は札幌市が 99%超、石狩市が約 90%である。また、流入するのは下水処理場からだけではなく、雨天時に処理場への送水が困難となった場合、中継ポンプ場からの河川への直接放流がある。その放流量は、表-2 に示しているように、最も大きいのが茨戸処理場に送水している茨戸西部中継ポンプ場で、年間平均（1997～2000 年の 4 年間）約 220 万 m³となっている。

このほかにも、志美運河を通して石狩川からの逆流や湖盆間の交換があり、それを全て包括し、流入と流出に分けて整理する。なお、流入・流出量の推算是原則として日単位で行った。

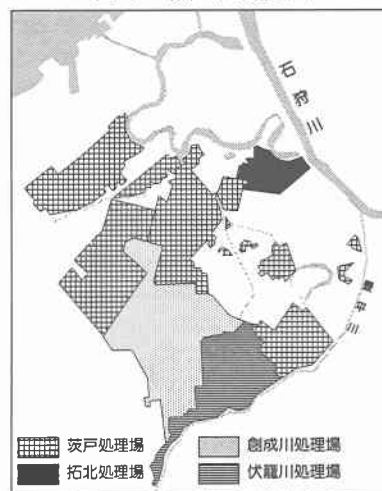


図-2 下水処理区分類図

表-1 流域面積および下水処理区面積

	流域	水域	单位 km ²			
			晴天時		雨天時	
			処理区	未処理区	処理区	未処理区
荒戸川	159.40	4.57	72.40	82.43	67.04	87.79
上部湖盆	6.31	0.61	2.32	3.38	0.00	5.70
中部湖盆	11.78	1.23	2.73	7.82	1.01	9.54
下部湖盆	141.31	2.73	67.35	71.23	66.03	72.55

(1) 流入

流入には、①水面への降水量、②茨戸川に注ぐ主要河川である創成川、伏籠川、発寒川（3河川）からの流入、③茨戸処理場からの放流、④3河川以外残流域（晴天時・雨天時）からの流入、⑤志美運河を通して石狩川からの逆流が考えられる。なお、図-2に示す区域の下水処理水は上記3河川もしくは茨戸処理場を經由して茨戸川に流入する。それ以外の区域を残流域としている。

表-2 下水処理場緒元

	排水箇所	流域面積 km ²	処理人口 千人	放流量 *10 ³ m ³ /年					
				1996	1997	1998	1999	2000	平均値**
創成川処理場*	創成川	20.64	214	45,751	43,695	41,408	39,079	44,655	42,918
創成川第2中継ポンプ場*	創成川	(2.49)		0	29	50	0	17	19
創成川第3中継ポンプ場*	創成川	(0.49)		0	0	0	0	0	0
伏龍川処理場*	伏龍川	10.98	76	19,382	17,719	18,832	18,858	21,507	19,260
伏龍川雨水ポンプ場*	伏龍川	(3.16)		449	359	554	284	585	446
茨戸東部中継ポンプ場*	伏龍川	(6.46)		792	537	791	590	1,470	836
茨戸中部中継ポンプ場*	伏龍川	(11.50)		682	697	1,002	392	1,329	820
茨戸処理場	伏龍川	36.41	163	56,403	51,176	51,696	52,509	53,994	53,156
茨戸西部中継ポンプ場*	免差川	(11.43)		1,668	2,013	2,068	1,738	3,702	2,242

ポンプ場の放流量は、河川への直接放流量を指す。*1996年は、4月～12月までのデータ **1997年～2000年までのデータの平均

まず、水面降水量は石狩（アメダス）のデータから求め、年平均値（1996～2000 の平均）で 962mm となった。次に創成川、伏籠川、発寒川からの流入量については、茨戸川の合流点付近で北海道開発局が実施している観測データを用いた。ちなみに、雨天時は表-2 にあるようなポンプ場からの排水がある。

また、茨戸川に直接放流している茨戸処理場は、札幌市下水道局より提供していただいた日総処理量（簡易処理量+高級処理量）のデータを用いている。

残流域（下水道未処理区）からの流入量は、創成川処理場への下水流入量を晴天時のものを汚水量とし、降水日の流入下水流量から降水日前後を平均した晴天時汚水量を引いたものを雨水量と分類した。それによって汚水量（晴天時）は人口当たりに、雨水量（降水時）は面積当たりにし、残流域の流入量を算出している。

志美運河からの流入 Q_{shibi} は、下式 (1) に示すように前述した流入量 Q_I （降水量、3 河川、茨戸処理場、残流域）から、茨戸地点の水位から算出される貯留量変化量 ΔQ と後述する流出量 Q_O （石狩放水路、水面蒸発量）の残差として次式から求める。

$$\Delta Q = Q_I - Q_O \pm Q_{shibi} \tag{1}$$

ここで、 Q_{shibi} の符号が+のとき石狩川から茨戸川への逆流、-のとき茨戸川から石狩川への順流を意味する。

(2) 流出

流出には、⑥平常時の志美運河を通しての石狩川への流出、⑦洪水時の石狩放水路を通しての海への流出、⑧水面からの蒸発が考えられる。通常は石狩放水路の水門が閉じた状態で、志美運河の水門は開いている。しかし、洪水時には石狩川からの逆流を防ぐために志美運河の水門を閉じ、石狩放水路から海に直接流出させることにより、茨戸川の水位上昇を抑制している。

なお、志美運河においては、式 (1) の Q_{shibi} の符号が負の時を順流として流出量としている。

石狩放水路からの流出量は、水門開扉時の操作記録として記録されている流量を実測値として用いている。

また、水面からの蒸発はバルク法を用いて算出しており、年平均の蒸発量は 648mm と推定された。バルク法に必要な気象データは石狩（アメダス）、札幌（気象官署）の値を用いた。

(3) 水収支

先に述べたように茨戸川は上部湖盆、中部湖盆、下部湖盆と分かれ、それぞれが狭い水路で連結されている。そのため水収支を考える上では、それらの部分を通しての交換量について考えなければならない。

交換量については、北海道開発局により 2002 年の 6 月から上部湖盆、中部湖盆、下部湖盆で水位を観測し、それぞれの連結部に存在する山口橋（上部湖盆-中部湖盆間）、観音橋（中部湖盆-下部湖盆間）において流量と流向を観測している。観音橋における流向と流速および茨戸地点の水位より、茨戸地点の水位が最も低下したときに下部湖盆に向かう流量が最大になり、水位が最大ときに中部湖盆へ向かう流量が最大となっている。すなわち、

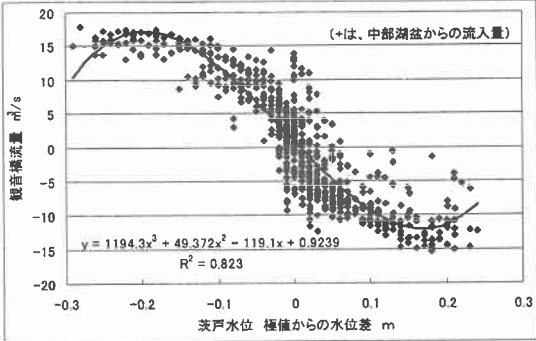


図-3 流量（観音橋）と極値からの水位差（茨戸）との関係

表-3 湖盆別の水質項目別水収支算出結果

単位 10³・m³/年

	上部湖盆	1996	1997	1998	1999	2000	平均値*	%
流入	水域 降水量	584	557	583	476	735	588	2.6
	残流域 晴天時	13	16	17	16	17	16	0.1
	残流域 雨天時	1,598	1,848	1,810	2,024	2,819	2,125	9.3
	中部湖盆交換量	19,601	19,980	19,365	20,514	20,772	20,158	88.1
	中部湖盆交換量	35,560	35,625	36,545	35,468	35,189	35,707	98.9
流出	蒸発量	396	399	403	402	377	395	1.1

	中部湖盆	1996	1997	1998	1999	2000	平均値*	%
流入	水域 降水量	1,177	1,123	1,175	961	1,482	1,185	0.9
	残流域 晴天時	142	179	189	181	188	184	0.1
	残流域 雨天時	2,675	3,093	3,030	3,387	4,718	3,557	2.6
	上部湖盆交換量	35,560	35,625	36,545	35,468	35,189	35,707	25.7
	下部湖盆交換量	97,237	98,129	95,434	99,207	100,858	98,407	70.8
流出	上部湖盆交換量	19,601	19,980	19,365	20,514	20,772	20,158	13.6
	下部湖盆交換量	126,872	127,094	130,716	126,303	125,437	127,387	85.9
	蒸発量	798	805	813	810	760	797	0.5

	下部湖盆	1996	1997	1998	1999	2000	平均値*	%
流入	水域 降水量	2,613	2,492	2,607	2,132	3,290	2,630	0.8
	残流域 晴天時	154	193	204	196	203	199	0.1
	残流域 雨天時	9,835	11,372	11,139	12,452	17,344	13,077	3.9
	創成川	38,779	40,746	45,308	48,033	44,895	44,746	13.5
	発寒川	32,960	34,834	39,102	38,629	35,448	37,003	11.2
	伏籠川	30,898	28,093	35,472	40,906	32,417	34,222	10.3
	茨戸処理場	56,403	51,176	51,696	52,509	53,994	52,344	15.8
	中部湖盆交換量	126,872	127,094	130,716	126,303	125,437	127,387	38.4
	志美運河 逆流	9,204	19,693	16,441	19,073	24,020	19,807	6.0
	中部湖盆交換量	97,237	98,129	95,434	99,207	100,858	98,407	31.3
流出	志美運河 順流	154,967	191,197	212,294	210,308	211,116	206,229	65.5
	石狩放水路	0	6,116	643	12,549	14,362	8,418	2.7
	蒸発量	1,771	1,787	1,805	1,797	1,687	1,769	0.6

*1997年～2000年までのデータの平均

表-4 湖盆別平均滞留時間（1997～2000 の平均）

単位 日 (10³・m³)

	全体	上部湖盆	中部湖盆	下部湖盆
	32 (30)	1 (1.847)	12 (3.928)	17 (13.326)

() 内は、年間における日平均貯留量 滞留時間は月平均値から算出

下部湖盆にある茨戸地点の水位の上下により、水位変動に時間遅れのある中部湖盆との間に水面勾配が生じ、流動が起きるわけである。これに基づき、水位の極値からの変動量と流量を比較したときに図-3 に示すような関係を得た。また、山口橋においても同様の相関が得られている。

以上より得られた結果をもとに湖盆別の水収支を整理したものを表-3 に示す。表-3 に示された結果より、閉鎖性水域である上部湖盆における水収支は中部湖盆との交換が支配的であることがわかった。また、湖盆別の滞留時間を表-4 に示しているが、上部湖盆は 30 日と著しく長いことがわかる。

また、上部湖盆と同様に閉鎖性水域である中部湖盆においては、やはり上部湖盆と下部湖盆との交換量が支配的であり、その中でも下部湖盆との交換量が大半であることがわかる。滞留時間については、湖盆間の水交換が大きいために 12 日となっている。

最後に下部湖盆では中部湖盆との交換量は 4 割、3 河川（創成、伏籠、発寒）からの流入量が約 3 割、茨戸処

理場からの放流量が約2割と多様な流入形態であることがわかる。また、下流の石狩川からの逆流も全体のおよそ6%を占めている。滞留時間は約17日となっている。全体的に見ると、交換量は下流にいくほど多い。逆に上部湖盆は水交換が著しく制限されており、中部湖盆も停滞性の大きい上部湖盆と一体とみると、水交換は観音橋というボトルネックで制限されているとみなせる。なお、下水道整備が行き届いているので、残流域からの未処理水(晴天時)の流入量はわずかであることがわかる。

3. 熱収支の推算

熱収支の推算においては、日単位の流入量、流出量と、それに対応した熱フラックスを基本とした。すなわち、流入量、流出量は日平均値を用いて時間単位の演算を行い、また、水面への熱フラックスについては、時間単位で推算し、日平均水温の推定を行っている。

流入する熱フラックスには、①茨戸川に注ぐ主要河川である創成川、伏籠川、発寒川(3河川)からの流入水温、②茨戸処理場からの放流水温、③3河川以外残流域(晴天時・雨天時)からの流入水温、④志美運河を通して石狩川からの逆流時の水温、⑤水面への熱フラックスが考えられる。

まず、創成川、伏籠川、発寒川の水温は、公共用水域の月に一度観測されている水温を日番号(1/1~12/31、1~365)に対する正弦曲線で近似し、日平均水温として整理した。次に、残流域については3河川の平均水温を日番号に対する正弦曲線で近似し、日平均水温を与えた。

また、茨戸処理場からの放流水温は、札幌市下水道局より提供していただいた維持管理年報¹⁾より、簡易処理時、高級処理時の水温を日番号に対する正弦曲線で近似し、日平均水温として与えた。

志美運河を通して石狩川からの逆流時の水温は、石狩市で観測している志美運河水温の逆流時のものと、北海道開発局で観測している石狩大橋の水温との相関関係から推定し、日平均値として与えている。

水面への熱フラックス ϕ は、下式(2)から求める。

$$\phi = \frac{A}{\rho C_w} \left\{ (1 - \alpha) S \downarrow + L \downarrow - \varepsilon \sigma T^4 - H - IE \right\} \quad (2)$$

ここで、 $S \downarrow$; 日射量(W/m^2)、 $L \downarrow$; 下向き長波放射量(W/m^2)、 A ; 水面積(m^2)、 ρ ; 水の密度($1,000kg/m^3$)、 C_w ; 水の比熱($4,180J/deg/kg$)、 T ; 湖盆の水温(K)、 α ; 水面のアルベド(0.06)、 ε ; 射出率(1.00)、 σ ; Stefan-Boltzmann係数($5.67 \times 10^{-8} W/m^2/K^4$)を表す。

以上より得られた結果をもとに、下式(3)より湖盆毎の水温を推算する。

$$\frac{d(TV)}{dt} = T_{in}Q_{in} - TQ_{out} + \phi \quad (3)$$

ここで、式(3)のパラメータの意味を表-5に示す。

以上より、推算された湖盆別の水温結果を図-4に示す。また、下部湖盆における水面への熱フラックスを図-5に、流入と志美運河の流出エネルギーを比較したものを図-6に示す。図-4に示された結果より、上部湖盆においては、精度良く再現されているが、中部湖盆、下部湖盆においては水温が過大に推算されている。また、図-5の水面へ

表-5 水温推定式のパラメータ

T ; 湖盆の水温(deg)	V ; 湖盆の容積(m^3)	t ; 時間
T_{in} ; 流入水温(deg)	[④ ; 山口橋逆流、観音橋逆流、残流域]	
	[⑤ ; 山口橋順流、観音橋順流、残流域]	
	[⑥ ; 観音橋順流時、3河川、茨戸処理場、志美運河逆、残流域]	
Q_{in} ; 流入量(m^3/s)	[T_{in} に対応した流量]	
T ; 流出水温(deg)	湖盆の水温	
	[④ ; 山口橋順流]	
	[⑤ ; 山口橋逆流、観音橋順流]	
	[⑥ ; 観音橋逆流、志美運河順流]	
Q_{out} ; 流出量(m^3/s)	[T_{out} に対応した流量]	
ϕ ; 水面への熱フラックス(deg・ m^3/s)		
④ ; 上部湖盆、⑤ ; 中部湖盆、⑥ ; 下部湖盆		

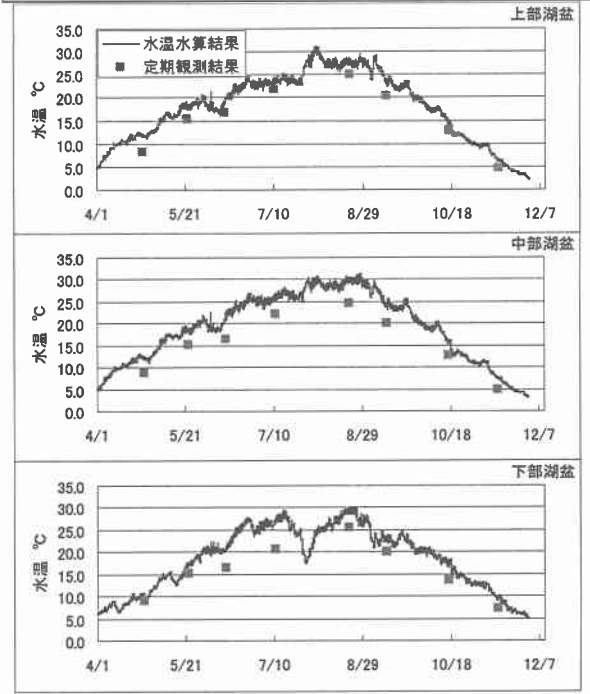


図-4 湖盆別の水温推定結果(流量日データ)

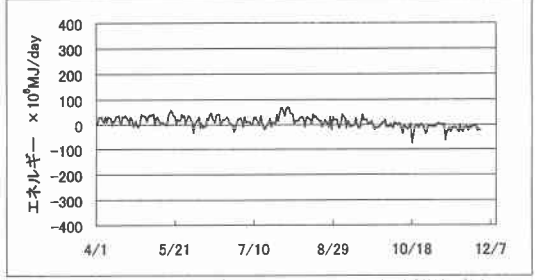
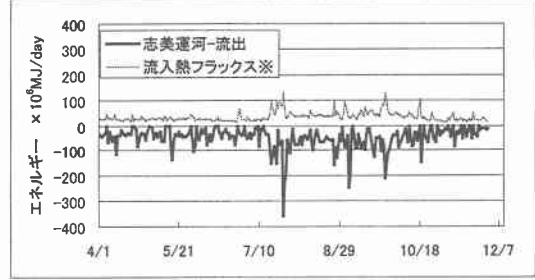


図-5 水面への熱フラックス(下部湖盆)



※3河川、茨戸処理場、残流域、志美運河逆流の熱フラックス

図-6 流入と志美運河流出熱フラックスの比較(下部湖盆)

の熱フラックスに関しては、水温への影響は少なく、図-6に示す流入する熱フラックスによる影響が大きいことがうかがえる。しかし、流入の熱フラックスの変

化をみたときに4月～7月にかけて一様な変化が少なく、水位の日変動が顕著である茨戸川の特性に適当でないと考えられる。これは、3河川流入量と志美運河流出量に日平均流量を用いているために、時間変動がキャンセルされてしまい交換量を過小評価していることが考えられる。そこで、熱収支を推算するうえで、すべての場所で時間単位の水交換を考慮する必要がある。

4. 時間単位における水収支と熱収支

前述したように、水収支を時間単位で算出し、熱収支を考慮する。

流入には、2章で記述した①水面への降水量、②3河川からの流入量、流出には、⑦洪水時の石狩放水路を通しての海への放出について時間単位で算出することとした。同様に山口橋、観音橋における交換量については、既に述べたように時間データを用いている。ただし、これ以外のデータは日平均値を時間単位で与え、計算している。さらに、志美運河下流水位と茨戸水位を比較したときに、茨戸水位の方が低いとき（志美運河逆流時）には、3河川からの流入量をゼロとしている。

また、式(1)に示すように、時間単位における貯留量変換量から志美運河の流入量、流出量を算出している。以上で得られたデータより時間単位で算出した水収支の結果を表-6に示す。表-6と表-3を比較すると、志美運河における順流が2倍、逆流が10倍近くにもなっていることがわかる。このことより、日平均流量で推算していたときは、順逆流の流量がキャンセルされ、交換量が過小評価されていたことが明らかになった。

また、3河川の流入と志美運河の流出にともなう熱フラックスを比較したものを図-7に示す。図-7と図-6を比較すると志美運河の交換量の増大とともに流出入の熱フラックスが増大していることがわかる。これより、湖盆毎に水温を推算した結果を図-8に示す。図-8より、図-4に示す下部湖盆の水温の推定精度が良くなっていることがわかる。すなわち、複雑な流出入過程をもつ茨戸川では、時間単位の流出入を勘案しなければ、熱収支を把握することが困難であることがわかる。しかし、中部湖盆においては依然としてやや過大に推算されている。これは、観音橋における交換量の6月～7月のデータを用いて推定しているため、融雪や出水といった水位変動が顕著な時期のデータが不足しているために交換量を過小評価していることが考えられる。

5. おわりに

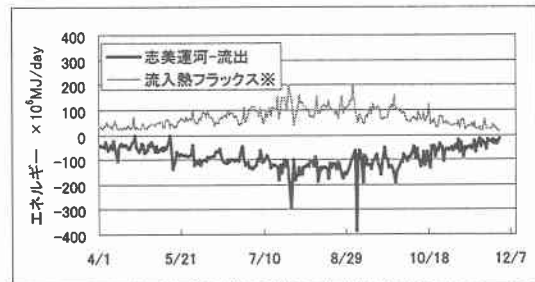
本研究で得られた知見を以下に示す。

- ・ 茨戸川における水収支、熱収支を定量化した。
- ・ 閉鎖性の高い上部湖盆、中部湖盆においては、流入、流出ともに湖盆間の交換量が支配的である。
- ・ 水質形成要因を考えるうえで、茨戸川においては時間変動を考慮した流出入の推算が必要である。

以上より、複雑な流入、流出過程を持つ都市集水域における水収支、熱収支の動向を明らかにした。今後は、今回得られた知見を水質シミュレーションに生かし、各種対策の改善効果を評価することなどに生かしていきたい。

表-6 時間単位の水収支

			単位 $10^3 \text{ m}^3/\text{年}$		
上部湖盆			2000	%	
水	域	降水量	735	3.0	
流入	残流域	晴天時	17	0.1	
	残流域	雨天時	2,819	11.6	
	中部湖盆交換量		20,768	85.3	
流出	中部湖盆交換量		35,189	98.9	
	蒸発量		377	1.1	
中部湖盆			2000	%	
水	域	降水量	1,482	1.0	
流入	残流域	晴天時	188	0.1	
	残流域	雨天時	4,718	3.3	
	上部湖盆交換量		35,189	24.7	
	下部湖盆交換量		100,838	70.8	
流出	上部湖盆交換量		20,768	14.1	
	下部湖盆交換量		125,437	85.4	
	蒸発量		760	0.5	
下部湖盆			2000	%	
水	域	降水量	3,290	0.6	
流入	残流域	晴天時	203	0.0	
	残流域	雨天時	17,344	3.0	
	創成川		44,889	7.8	
	発寒川		35,449	6.2	
	伏古川		32,407	5.7	
	茨戸処理場		53,994	9.4	
	中部湖盆交換量		125,437	21.9	
	志美運河 逆流		259,133	45.3	
流出	中部湖盆交換量		100,858	21.5	
	志美運河 順流		453,701	96.6	
	石狩放水路		14,362	3.1	
	蒸発量		1,687	0.4	



※3河川、茨戸処理場、残流域、志美運河逆流の熱フラックス

図-7 流入と志美運河流出熱フラックスの比較
(下部湖盆、流量時間データ)

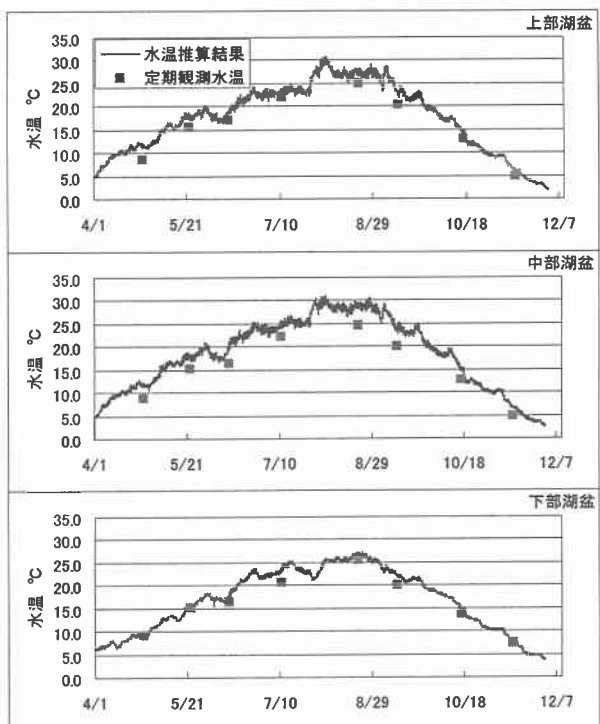


図-8 湖盆別の水温推定結果 (流量時間データ)

謝辞: 本研究の一部は、平成14年度北海道開発受託研究費の補助を受けて実施された。また、札幌市下水道局および石狩市生活環境部からは、資料を提供していただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 札幌市下水道局; 維持管理年報 (1989～2000)。
- 2) 中津川誠ら; 長大な停滞水域における富栄養化状態について, 第9回世界湖沼会議発表論文集, Session3-1, pp.305～308, 2001。