

琵琶湖集水域からの汚濁物流出特性に関するシミュレーション解析

SIMULATIONS OF POLLUTANT RUNOFF FROM LAKE BIWA BASIN

市木 敦之*

大西 敏之**

山田 淳*

Atsushi ICHIKI *, Toshiyuki OHNISHI ** and Kiyoshi YAMADA *

ABSTRACT ; The objectives of this study are to simulate pollutant runoff load into Lake Biwa using Macro Model and examine the runoff characteristics of pollutants. As a result of the simulations, runoff pollutant load in every river which flowed into Lake Biwa was calculated. And the runoff characteristics of pollutants during dry weather days and storm events from Lake Biwa basin were examined in consideration of the characteristics of the basin. In the results, some available knowledge concerned with the environmental management in Lake Biwa basin was obtained.

KEYWORDS ; characteristics of a river basin, environmental management in a basin, Lake Biwa, Macro Model, pollutant runoff

1. はじめに

近畿圏1400万人の水源地である琵琶湖は、集水面積が広大でかつ大小100以上の流入河川を有している。こうした集水域から流入した汚濁物は、長い滞留時間を通じて直接的に、あるいは湖内の底質成分となって間接的に、琵琶湖水質に影響を及ぼしている。そのため、琵琶湖の水質保全を議論するためには、巨視的にはあっても、集水域からの汚濁物流出量や流出特性を把握しておく必要がある。琵琶湖流入河川を対象とした汚濁物流出調査は、これまで多く行われており、國松ら¹⁾は主に山林や農地を流下する河川において自然系負荷を対象とした流出調査を実施しており、また筆者ら²⁾も市街化区域を流域内に有する河川において市街地ノンポイント負荷を対象とした同様の流出調査を継続的に行ってきた。しかし、いずれも調査で対象とした個々の流域における事例評価としての検討は行われているものの、得られた成果を援用して琵琶湖集水域全域からの流出特性が検

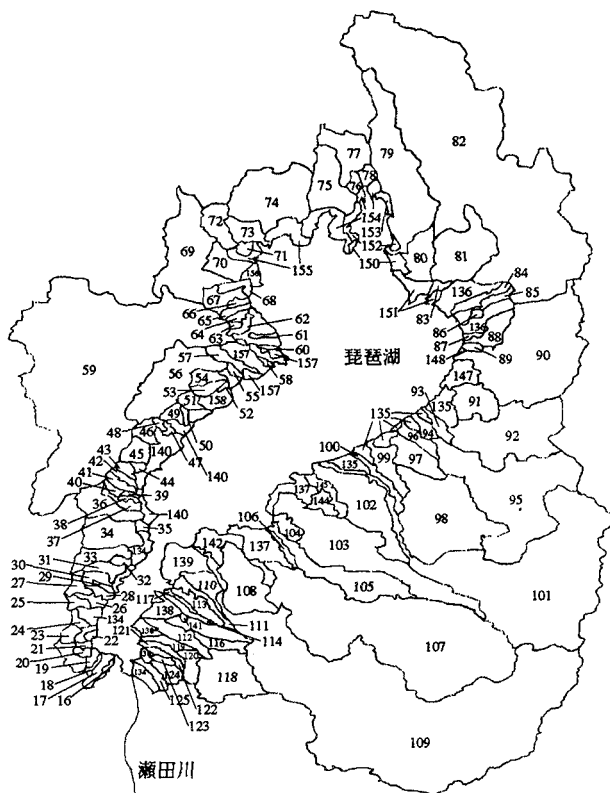


図-1 流入河川による琵琶湖集水域の分割
(番号は流域コード)

* 立命館大学理工学部

Department of Civil and Environmental Systems Engineering, Ritsumeikan Univ.

** (株) クリアス

CLEARTh Co., LTD.

討された例^{3)~5)}は少ない。近年、琵琶湖への流出負荷量に関する将来予測の試み⁶⁾や琵琶湖水質改善を目指した実験施設の検討⁷⁾が行われつつあるものの、それらが依拠すべき現在の集水域における汚濁物流出特性についての情報に乏しいのが現状である。従来、集水域からの流出負荷量の推定計算には、原単位法が用いられることが多かった⁸⁾が、こうした手法では、流域構造の違いや降雨をはじめとする水文因子によってダイナミックに変化する汚濁物の流出特性を的確に表現できないため、筆者らは流域特性や晴・雨天時別の流出特性を考慮した汚濁物流出モデル

(以下「マクロモデル」とする)を提案し、汚濁物流出のシミュレーション解析を実施してきた^{9)・10)}。本研究は、非常に巨視的ではあっても琵琶湖集水域全域からの汚濁物流出特性を議論するためのフレームワークを作ることとを目的とし、ここでは、マクロモデルを琵琶湖集水域に適用し、流入河川毎に栄養塩に関する流出シミュレーションを行うことにより、琵琶湖への汚濁物流出特性について定量的な検討を試みた。

2. 琵琶湖集水域の概要

琵琶湖からの唯一の流出河川である瀬田川へ直接流入する河川流域を除いた琵琶湖集水域を、流入河川流域により区分して図-1に、また1990年現在の各流入河川流域の概要を表-1に示す。琵琶湖集水域には、雨水流出成分が河川を経由せずに、小水路等によって直接琵琶湖へ流出している流域(一級河川流域外)が含まれるため、ここでは、当該流域(流域コード134~159)を、その所在する市町村名で表記し、併せて琵琶湖流入河川流域としている。各流入河川流域のフレーム値を、琵琶湖集水域についてまとめたものが表-2である。ただし、ここでは

表-1 琵琶湖流入河川流域の概要 (1990年現在)

流域コード	河川名	区分	流域面積(km ²)	流域人口(人)	下水道普及率(%)	流域コード	河川名	区分	流域面積(km ²)	流域人口(人)	下水道普及率(%)
16	兵田川	南湖西岸	0.87	4916	100.0	83	川瀬川	北湖東岸	10.36	1324	25.1
17	篠津川	南湖西岸	0.89	2711	98.3	84	米川	北湖東岸	2.43	13168	0.4
18	相模川	南湖西岸	3.10	4724	100.0	85	十一川	北湖東岸	1.92	9199	0.4
19	常性川	南湖西岸	0.61	5307	100.0	86	瀬野川	北湖東岸	0.95	3053	0.4
20	香妻川	南湖西岸	1.87	2050	100.0	87	深町川	北湖東岸	1.05	359	0.3
21	百々川	南湖西岸	1.26	5276	100.0	88	土川	北湖東岸	8.42	3536	0.3
22	不動川	南湖西岸	1.16	1326	100.0	89	びわだ川	北湖東岸	6.12	1765	0.0
23	柳川	南湖西岸	2.73	3982	39.2	90	大野川	北湖東岸	86.86	27724	0.5
24	藤川	南湖西岸	3.05	4260	22.3	91	矢倉川	北湖東岸	14.58	3994	0.0
25	四ッ谷川	南湖西岸	2.93	2175	24.2	92	芥川	北湖東岸	27.41	10473	0.0
26	瀬乃木川	南湖西岸	1.63	1331	24.2	93	平田川	北湖東岸	1.50	16576	0.0
27	大宮川	南湖西岸	6.13	3361	35.6	94	野瀬川	北湖東岸	1.21	12534	0.0
29	高橋川	南湖西岸	1.06	4639	100.0	95	大上川	北湖東岸	35.79	14136	0.7
30	大正寺川	南湖西岸	2.99	1663	38.4	96	江面川	北湖東岸	1.71	5785	0.0
31	越前川	南湖西岸	5.12	2419	22.1	98	宇倉川	北湖東岸	315.33	49442	10.1
32	湯戸川	南湖西岸	1.53	958	46.5	99	文様川	北湖東岸	6.90	9215	0.0
33	天神川	南湖西岸	9.83	4226	40.2	100	不飲川	北湖東岸	13.34	5258	0.0
34	真野川	南湖西岸	20.53	6377	22.4	101	愛知川	北湖東岸	218.43	14182	14.6
35	丹川	南湖西岸	1.38	6136	95.1	102	大間川	北湖東岸	166.07	35515	3.0
36	和蘭川	北湖西岸	17.67	2534	0.3	103	長命寺川	北湖東岸	208.15	58052	7.7
37	喜賀川	北湖西岸	4.42	1051	0.0	104	八幡川	北湖東岸	5.48	10468	17.9
38	真光寺川	北湖西岸	2.37	96	0.0	105	白鳥川	北湖東岸	30.56	21997	11.5
39	生川	北湖西岸	1.03	91	0.0	106	大惣川	北湖東岸	1.27	3556	0.0
40	大川	北湖西岸	2.37	443	0.0	107	日野川	北湖東岸	183.39	59468	6.0
41	八戸川	北湖西岸	3.16	415	0.0	108	家穂川	北湖東岸	45.57	30949	4.9
42	野瀬子川	北湖西岸	1.20	437	0.0	109	野洲川	北湖東岸	217.02	111327	81.3
43	木戸川	北湖西岸	0.95	362	0.0	110	辻草川	南湖東岸	8.49	10411	23.2
44	大川	北湖西岸	1.39	182	0.0	111	天神川	南湖東岸	2.70	5684	32.3
45	大谷川	北湖西岸	3.41	729	0.0	112	守山川	南湖東岸	5.32	10140	45.0
46	比良川	北湖西岸	2.64	319	0.0	113	山賀川	南湖東岸	3.97	10949	62.1
47	家穂川	北湖西岸	0.99	297	0.0	114	塊川	南湖東岸	2.47	2302	0.1
48	大室川	北湖西岸	0.63	120	0.0	116	栗山川	南湖東岸	22.86	33257	27.8
49	瀬川	北湖西岸	1.87	480	0.0	117	伊佐々川	南湖東岸	15.55	34133	54.3
50	北川	北湖西岸	0.49	116	0.0	118	草津川	南湖東岸	34.43	7736	28.4
51	瀬川	北湖西岸	5.49	216	8.3	119	山寺川	南湖東岸	5.31	9996	47.4
52	瀬川	北湖西岸	0.67	263	17.9	120	伯母川	南湖東岸	14.79	13612	22.6
53	小田川	北湖西岸	4.56	634	17.8	121	北川	南湖東岸	2.90	2622	12.9
54	和田内川	北湖西岸	6.79	784	17.9	122	前川	南湖東岸	2.82	4566	64.8
55	越川	北湖西岸	0.91	475	17.7	123	十津寺川	南湖東岸	3.60	2796	26.3
56	鴨川	北湖西岸	52.60	2978	13.8	124	猿川	南湖東岸	12.01	10466	13.1
57	青井川	北湖西岸	4.53	2568	0.6	125	長沢川	南湖東岸	3.08	8261	88.4
58	金丸川	北湖西岸	0.56	590	0.0	134	大津市	南湖東岸	25.65	98258	70.8
59	安曇川	北湖西岸	202.07	7222	0.2	135	彦根市	南湖東岸	9.45	26543	0.0
60	神奈川	北湖西岸	1.83	732	1.4	136	長浜市	南湖東岸	11.10	26072	0.4
61	南川	北湖西岸	1.70	714	1.4	137	近江八幡市	南湖東岸	31.71	12477	9.1
62	田井川	北湖西岸	14.35	1557	1.4	138	草津市	南湖東岸	31.64	17361	16.5
63	林瀬寺川	北湖西岸	8.42	141	1.4	139	守山市	南湖東岸	21.29	20028	18.8
64	今川	北湖西岸	12.49	196	1.5	140	志賀町	南湖東岸	39.11	5611	1.9
65	波布谷川	北湖西岸	7.19	130	1.5	141	栗東町	南湖東岸	1.62	1622	46.5
66	庄原川	北湖西岸	1.92	923	1.4	142	中主町	南湖東岸	20.48	3522	7.2
67	天川	北湖西岸	31.10	1675	1.4	143	野洲町	南湖東岸	5.86	2108	0.0
68	今津川	北湖西岸	3.73	2139	1.4	144	安土町	南湖東岸	14.16	1397	0.0
69	石田川	北湖西岸	87.62	2974	1.4	145	能登川町	南湖東岸	22.03	1541	1.8
70	堀川	北湖西岸	12.63	2105	1.4	146	愛知川町	南湖東岸	0.67	3	0.0
71	新保川	北湖西岸	1.85	441	10.0	147	米原町	南湖東岸	3.15	5108	0.0
72	百瀬川	北湖西岸	16.26	958	5.2	148	近江町	南湖東岸	1.61	469	0.0
73	生来川	北湖西岸	8.20	1194	10.0	149	彦根町	南湖東岸	0.67	167	0.0
74	知内川	北湖西岸	57.93	2117	10.0	150	湖北町	南湖東岸	4.56	1375	24.1
75	大田川	北湖西岸	25.82	1701	9.5	151	びわ町	南湖東岸	47.89	6232	30.8
76	岩瀬川	北湖西岸	3.26	282	9.6	152	高月町	南湖東岸	4.27	160	4.4
77	大川	北湖西岸	18.61	1357	9.5	153	木之本町	南湖東岸	0.15	389	0.0
78	大坪川	北湖西岸	3.18	502	9.6	154	西浅井町	南湖東岸	12.16	1500	9.5
79	余興川	北湖東岸	43.96	11852	8.4	155	木之本町	南湖東岸	11.33	2338	10.0
80	丁野太川	北湖東岸	44.93	6303	20.1	156	今津町	南湖東岸	3.65	3058	1.4
81	田川	北湖東岸	67.76	14967	5.6	157	安曇川町	南湖東岸	7.73	7292	0.0
82	瀬川	北湖東岸	152.92	24140	3.2	158	高島町	南湖東岸	11.19	1963	17.8
						159	新旭町	南湖東岸	17.20	5039	1.4

北湖、南湖にそれぞれ流入する河川を東岸側、西岸側に区分することにより、琵琶湖流入河川を4カテゴリー(北湖東岸、北湖西岸、南湖東岸、南湖西岸)にグルーピングしている(北湖流入河川は大川(流域コード77)と大坪川(流域コード78)の間を、南湖流入河川は瀬田川(琵琶湖集水域外)を境に

表-2 琵琶湖集水域の概要 (1990年現在)

区 分	流入河川数	集水面積(km ²)	土地利用 (%)				流域人口(×千人)	下水道普及率(%)
			市街地	田	畑	山林		
北湖	東岸	46	2111	5.47	18.21	2.35	73.97	679.4
	西岸	50	732	2.87	12.41	1.49	83.23	76.7
南湖	東岸	19	221	21.00	39.11	4.56	35.34	304.2
	西岸	19	68	11.93	15.38	0.34	72.35	64.1
全 域		134	3132	6.10	18.26	2.26	73.38	1124.4
								21.8

東西に区分)。集水面積が大きく、かつ大部分の河川が流入している北湖と比較して、南湖では、流域に占める市街地の比率や下水道普及率が相対的に高いのが特徴的である。

3. マクロモデルを用いた汚濁物流出シミュレーション

3.1 マクロモデルの概要

マクロモデルは、汚濁物の流出挙動が発生源や晴雨により大きく異なることを考慮して構築されており、その構成およびパラメータの同定に関しては、すでに既報^{9), 10)}で示されている。前述のように、本研究ではシミュレーションにより流出負荷量を琵琶湖集水域全域において議論するためのフレームワークを示すことが目的であるが、シミュレーションモデルについて精度の評価が十分でないと、幾分かの誤差を包含しつつも得られたシミュレーション結果自体が一人歩きしかねない。そのため、ここでは、流域内に市街地・非市街地とも一定面積を占める伊佐々川（流域コード117）において、筆者らが1994年11月1日から1年間継続的に行った汚濁物流出の実態調査¹¹⁾を基に、本モデルの再現性を検討した。調査では、降雨量、流量の測定を行うとともに、流量に降雨時流出の影響が現れ始めた時点から降雨終了後、平時の流量に戻るまでの間の直接流出量を降雨時流出量と考え、流量比例でコンポジットした採水試料の水質を分析した。また、同時にバックグラウンド値として降雨前後の平水時試料の水質分析も行った。調査を継続した1年間の降水量は、1449.5 mm/y となったが、これはこの地域でのほぼ平均的な年降水量と考えてよい。調査の結果とシミュレーションによる計算値を経時変動図にして図-2に示す。シミュレーションの計算時間ステップは1日であるため、継続時間が数日に及ぶ大きな降雨のあった梅雨期や秋雨期における計算値が、一降雨平均負荷量を示す実測値に比べて大きい場合が見受けられるものの、およそその変動についての再現性は確認できる。実測値と計算値の関係をみるため、両者について、流出時間を考慮した月別の積算比流出負荷量を算定して、相関図にしたものが図-3である。T-N、T-Pとも概ね実測値と計算値は一致している。特にT-Nでは、降雨の集中する梅雨期や秋雨期における流出負荷量

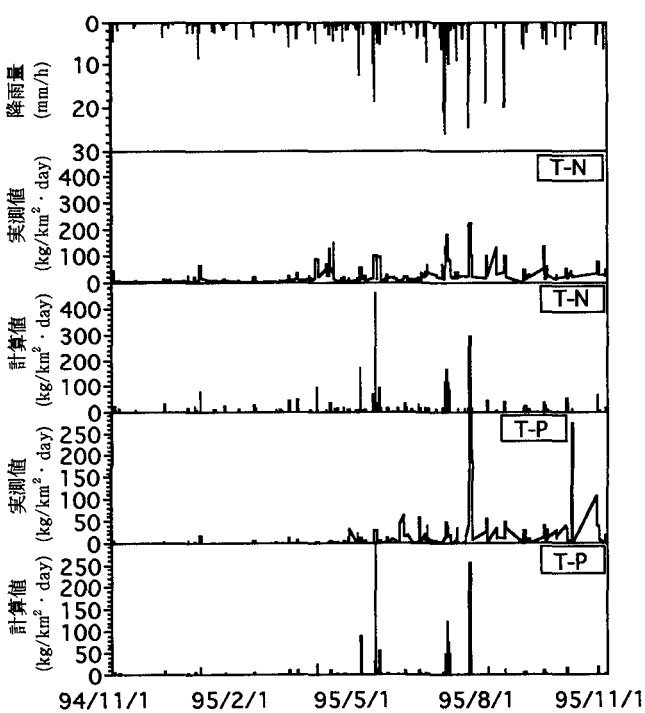


図-2 比流出負荷量の実測値と計算値の比較（伊佐々川）

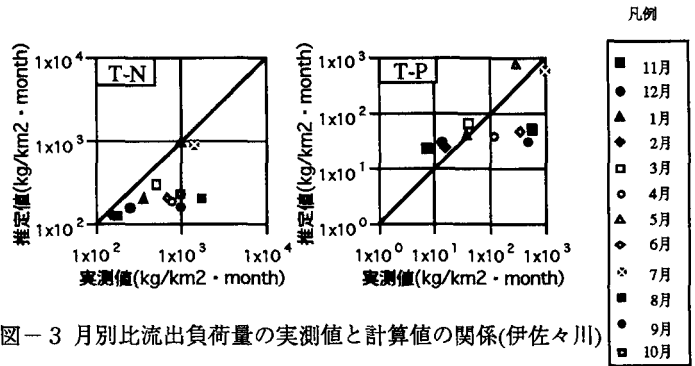


図-3 月別比流出負荷量の実測値と計算値の関係(伊佐々川)

同時にバックグラウンド値として降雨前後の平水時試料の水質分析も行った。調査を継続した1年間の降水量は、1449.5 mm/y となったが、これはこの地域でのほぼ平均的な年降水量と考えてよい。調査の結果とシミュレーションによる計算値を経時変動図にして図-2に示す。シミュレーションの計算時間ステップは1日であるため、継続時間が数日に及ぶ大きな降雨のあった梅雨期や秋雨期における計算値が、一降雨平均負荷量を示す実測値に比べて大きい場合が見受けられるものの、およそその変動についての再現性は確認できる。実測値と計算値の関係をみるため、両者について、流出時間を考慮した月別の積算比流出負荷量を算定して、相関図にしたものが図-3である。T-N、T-Pとも概ね実測値と計算値は一致している。特にT-Nでは、降雨の集中する梅雨期や秋雨期における流出負荷量

表-3 入力（降水量時系列）データの概要

期間		1980/1/1～1990/1/1
日数 (d)		3654
総降水量 (mm)		15623.3
年降水量 (mm/y)	最大	2042.0 (1980年)
	平均	1562.3
	最小	1161.0 (1984年)
降水量区分と 日数の分布 (d)	0～0.5 mm	2424
	0.5～10 mm	752
	10～30 mm	331
	30～100 mm	137
	100～ mm	10
合計		3654

を過小に評価する傾向があるものの、他の期間においては実測値と計算値の差がほとんどない。既報¹⁰⁾における流域毎の再現精度の検討結果と総合して、個別の流域に関して精緻な流出特性の議論を行うにはまだ相当の課題があるものの、本研究で意図する巨視的な傾向の検討には十分な精度とみなし、以下シミュレーション解析を試みた。

3.2 シミュレーションの方法と結果

シミュレーションでは、各流入河川流域について、表-1に示したそれぞれ固有の流域フレーム値(1990年現在)を用い、過去10年間に京都地方気象台で観測された降水量の時系列データ(平均年降水量1562.3mm/y)をマクロモデルに入力することにより、日単位の栄養塩流出負荷量を算定し、結果を平均して汚濁物の年間流出挙動を再現した。ただし、ここでは大気降下物、畜産排水、地下水流出成分に加えて、下水処理水による流出負荷量を検討の対象外としている。そのため、特にポイント負荷については、あくまで陸域からの流出段階の負荷量のみが対象となっている。表-3に入力した降水量時系列データの概要を示す。本来、特に北湖への流出負荷量を議論する際には、融雪期の汚濁物流出挙動や降水量の地域分布を考慮すべきであるが、融雪期の流出を表す簡易なモデルがないことや巨視的な枠組みを作るという観点から、ここでは、融雪にともなう汚濁物の流出は、降雨時流出と同じものとして、前述した方法によってシミュレーションを行った。シミュレーション結果を各流域における年間比流出負荷量についてまとめたものを、表-4に示す。

4. 琵琶湖集水域における汚濁物流出特性

4.1 汚濁物流出量の流域間比較

シミュレーション結果を各河川の年平均流出負荷量について降順にまとめたものを、表-5に示す。T-N、T-Pとも集水面積が大きい河川ほど流出負荷量が大きく、上位20河川からの合計流出負荷量が総流出負荷量の50%以上を占めていることから、琵琶湖への

表-4 流域からの年間比流出負荷量(シミュレーション結果)

流域 コード	河川名	区分	比流出負荷量 (ton/km2・y)		流域 コード	河川名	区分	比流出負荷量 (ton/km2・y)	
			T-N	T-P				T-N	T-P
16	兵田川	南湖西岸	1.09	0.93	83	川蓮川	北湖東岸	5.62	0.53
17	篠津川	南湖西岸	1.83	1.01	84	米川	北湖東岸	17.20	1.66
18	相模川	南湖西岸	2.53	2.07	85	十一川	北湖東岸	16.08	1.53
19	常世川	南湖西岸	1.20	0.63	86	美師堂川	北湖東岸	17.32	1.37
20	吾妻川	南湖西岸	2.49	1.44	87	深町川	北湖東岸	10.89	0.39
21	百々川	南湖西岸	2.07	1.18	88	土川	北湖東岸	7.81	0.41
22	不動川	南湖西岸	2.29	1.32	89	びわだ川	北湖東岸	6.74	0.33
23	柳川	南湖西岸	3.17	0.50	90	天野川	北湖東岸	3.53	0.17
24	藤川	南湖西岸	4.26	0.56	91	矢倉川	北湖東岸	5.12	0.28
25	四ッ谷川	南湖西岸	3.94	0.45	92	芹川	北湖東岸	3.48	0.21
26	藤乃木川	南湖西岸	3.74	0.48	93	平田川	北湖東岸	11.62	2.17
27	大宮川	南湖西岸	3.78	0.54	94	野瀬川	北湖東岸	13.41	2.21
28	足洗川	南湖西岸	2.28	2.27	95	大上川	北湖東岸	2.54	0.61
29	高瀬川	南湖西岸	2.96	4.21	96	江面川	北湖東岸	12.44	1.27
30	大正寺川	南湖西岸	4.18	0.80	98	宇曾川	北湖東岸	2.67	0.16
31	雄琴川	南湖西岸	5.47	0.77	99	文福川	北湖東岸	11.06	0.89
32	柳戸川	南湖西岸	3.92	1.05	100	不飲川	北湖東岸	4.84	0.28
33	天神川	南湖西岸	4.31	1.27	101	愛知川	北湖東岸	1.02	0.06
34	真野川	南湖西岸	5.39	0.79	102	大岡川	北湖東岸	2.96	0.15
35	丹出川	北湖西岸	2.80	6.05	103	長命寺川	北湖東岸	5.08	0.34
36	和賀川	北湖西岸	4.64	0.29	104	八幡川	北湖東岸	7.85	0.65
37	喜保川	北湖西岸	11.00	0.59	105	白鳥川	北湖東岸	4.60	0.43
38	真光寺川	北湖西岸	14.32	0.85	106	大瀬川	北湖東岸	14.47	1.44
39	生川	北湖西岸	12.17	0.71	107	日野川	北湖東岸	1.51	0.09
40	天川	北湖西岸	10.56	0.62	108	家瀬川	北湖東岸	5.33	1.47
41	八幡戸川	北湖西岸	9.75	0.49	109	野洲川	北湖東岸	1.06	0.09
42	野瀬子川	北湖西岸	8.13	0.24	110	法竜川	南湖東岸	7.26	1.18
43	木戸川	北湖西岸	4.61	0.25	111	天神川	南湖東岸	6.65	1.63
44	大川	北湖西岸	8.23	0.45	112	守山川	南湖東岸	6.08	2.49
45	大谷川	北湖西岸	4.52	0.21	113	山賀川	南湖東岸	4.47	3.20
46	比良川	北湖西岸	4.55	0.20	114	堀川	南湖東岸	12.04	0.97
47	家瀬川	北湖西岸	4.63	0.22	116	葉山川	南湖東岸	4.63	1.14
48	大釜川	北湖西岸	6.97	0.37	117	伊佐々川	南湖東岸	4.59	1.97
49	瀬川	北湖西岸	5.13	0.27	118	真津川	南湖東岸	3.22	0.56
50	北川	北湖西岸	3.78	0.21	119	山寺川	南湖東岸	4.88	1.65
51	鶴川	北湖西岸	4.45	0.22	120	伯母川	南湖東岸	3.59	0.34
52	鴨川	北湖西岸	4.20	0.32	121	北川	南湖東岸	5.70	0.53
53	小田川	北湖西岸	4.62	0.30	122	前川	南湖東岸	4.42	3.22
54	和田内川	北湖西岸	6.29	0.42	123	十曾寺川	南湖東岸	7.36	1.29
55	鮎川	北湖西岸	10.24	1.04	124	猿川	南湖東岸	4.79	0.41
56	鴨川	北湖西岸	4.97	0.29	125	長沢川	南湖東岸	2.79	2.52
57	青井川	北湖西岸	8.88	0.47	134	大津市	南湖東岸	2.75	1.54
58	金丸川	北湖西岸	18.05	0.95	135	彦根市	北湖東岸	8.33	0.87
59	安曇川	北湖西岸	0.89	0.04	136	長浜市	北湖東岸	14.88	1.04
60	神奈川	北湖西岸	11.21	0.60	137	近江八幡市	北湖東岸	5.95	0.50
61	南川	北湖西岸	12.82	0.71	138	草津市	南湖東岸	8.62	1.02
62	田井川	北湖西岸	6.01	0.23	139	守山市	南湖東岸	7.47	1.00
63	林瀬寺川	北湖西岸	4.90	0.19	140	志賀町	北湖西岸	10.98	0.70
64	今川	北湖西岸	4.97	0.21	141	京東町	南湖東岸	6.55	0.51
65	流布谷川	北湖西岸	4.73	0.19	142	中主町	北湖東岸	8.42	0.46
66	庄界川	北湖西岸	4.92	0.27	143	野洲町	北湖東岸	12.46	0.83
67	天川	北湖西岸	4.62	0.19	144	安土町	北湖東岸	7.95	0.26
68	今津川	北湖西岸	6.15	0.36	145	能登川町	北湖東岸	6.22	0.25
69	石田川	北湖西岸	2.36	0.10	146	愛知川町	北湖東岸	5.78	0.26
70	堀川	北湖西岸	6.31	0.28	147	米原町	北湖東岸	9.92	0.68
71	新保川	北湖西岸	5.97	0.37	148	近江町	北湖東岸	6.04	0.23
72	百瀬川	北湖西岸	4.47	0.20	149	虎姫町	北湖東岸	14.02	0.72
73	生来川	北湖西岸	5.40	0.29	150	湖北町	北湖東岸	8.88	0.86
74	知内川	北湖西岸	2.38	0.12	151	びわ町	北湖東岸	4.76	0.49
75	大瀬川	北湖西岸	6.70	0.36	152	高月町	北湖東岸	4.44	0.20
76	岩瀬川	北湖西岸	6.00	0.55	153	木之本町	北湖東岸	4.92	0.61
77	大川	北湖西岸	5.80	0.30	154	西浅井町	北湖東岸	5.12	0.25
78	大坪川	北湖西岸	7.13	0.41	155	マキノ町	北湖西岸	6.00	0.34
79	余呉川	北湖東岸	4.12	0.29	156	今津町	北湖西岸	8.35	0.56
80	丁野木川	北湖東岸	5.52	0.43	157	安曇川町	北湖西岸	10.90	0.59
81	田川	北湖東岸	6.79	0.30	158	高島町	北湖西岸	6.35	0.42
82	姉川	北湖東岸	1.87	0.08	159	新旭町	北湖西岸	8.66	0.43

流出負荷量は、こうした限られた幾つかの大河川にかなり依存していることがわかる。また、T-N 流出負荷量では、降順に市街地面積の比率が大きくなるのにもなって、相対的に田畑、山林などの非市街地からの流出分が減少しているのに対して、T-P 流出負荷量とそれらの関係は明瞭ではない。表－6 は、各河川の年平均流出負荷量を流域面積で除した比流出負荷量について降順に整理したものである。T-N 比流出負荷量と市街地面積比率の間に一定の傾向が認められるのは、表－5 の場合とよく似た傾向であるが、ここでは、集水面積が小さい都市河川が上位に位置している。この点についてはT-P においても同様で、流域に占める市街地の比率が大きい河川ほど上位に位置する結果となった。しかし、T-N の場合とは異なり、下水道普及率にもなってT-P 比流出負荷量が増加傾向を示しており、市街地を発生源とするかなりの量の量のノンポイント系負荷が、分流式雨水管をはじめとする排水系統を通じて流出しているものと推察される。

表－5 流域からの年間流出負荷量（負荷量について降順）

	順位	河川	合計集水面積 (km ²)	土地利用（％）				合計流域人口 (×千人)	平均下水道普及率 (％)	合計年平均流出負荷量 (ton/y)
				市街地	田	畑	山林			
T-N	1～20	長命寺川、宇曾川、大同川等	2269	4.43	16.34	1.98	77.24	500.5	9.8	6786.3
	21～40	天川、白鳥川、知内川等	447	7.46	23.01	3.49	66.05	196.8	10.2	2349.5
	41～60	文祿川、矢倉川、伊佐々川等	224	14.05	20.44	3.02	62.49	212.8	46.2	1242.4
	61～80	天神川、米川、びわだ川等	93	10.80	31.13	1.98	56.10	72.9	19.2	653.8
	81～100	今津川、大坪川、南川等	52	14.14	31.51	0.79	53.55	77.2	17.8	355.4
	101～120	比良川、四ッ谷川、深町川等	35	14.45	16.64	3.44	65.46	30.2	58.9	181.8
	121～	大堂川、木戸川、丹出川等	12	25.63	11.76	0.00	62.61	34.0	95.4	36.1
T-P	1～20	長命寺川、伊佐々川等	1627	7.00	21.16	1.94	69.91	624.6	24.0	577.4
	21～40	天野川、守山川、白鳥川等	947	4.28	14.02	2.76	78.95	237.7	18.3	209.7
	41～60	知内川、相模川、文祿川等	276	5.62	16.63	1.63	76.12	103.1	17.5	102.5
	61～80	不飲川、境川、八幡川等	153	5.19	14.33	4.31	76.18	80.3	11.4	63.1
	81～100	境川、生来川、江面川等	68	11.64	25.39	1.90	61.07	45.8	22.3	36.2
	101～120	波布谷川、今津川等	48	6.34	18.04	0.15	75.47	23.2	40.7	19.0
	121～	庄界川、瀧川、深町川等	13	16.47	10.61	5.79	67.14	9.7	55.4	4.2

表－6 流域からの年間比流出負荷量（比負荷量について降順）

	順位	河川	合計集水面積 (km ²)	土地利用（％）				合計流域人口 (×千人)	平均下水道普及率 (％)	年平均比流出負荷量 (ton/km ² ・y)
				市街地	田	畑	山林			
T-N	1～20	金丸川、薬師堂川、米川等	97	16.24	62.41	4.60	16.75	119.9	0.3	12.17
	21～40	深町川、天川、鮫川等	166	14.00	38.77	6.87	40.37	115.5	10.8	8.31
	41～60	大坪川、大堂川、田川等	252	6.66	22.82	3.25	67.27	64.0	16.2	6.37
	61～80	北川、川道川、丁野木川等	481	5.89	14.37	0.65	79.09	145.6	19.3	5.15
	81～100	波布谷川、伊佐々川等	232	7.19	19.92	0.94	71.95	127.9	35.1	4.61
	101～120	大正寺川、余呉川等	777	7.07	15.86	1.96	75.11	306.1	35.7	3.01
	121～	吾妻川、知内川、石田川等	1127	3.12	13.41	2.33	81.14	245.4	16.2	1.38
T-P	1～20	丹出川、高橋川、伊佐々川等	128	31.84	41.58	2.91	23.67	291.0	51.2	1.83
	21～40	不動川、十禅寺川、天神川等	143	16.60	50.38	5.38	27.64	175.7	20.4	1.05
	41～60	大正寺川、真野川、雄琴川等	180	12.29	36.72	3.41	47.58	79.1	16.7	0.66
	61～80	岩熊川、大宮川、北川等	263	6.43	20.46	3.22	69.89	88.6	15.9	0.46
	81～100	大坪川、土川、深町川等	512	5.38	18.19	1.31	75.11	122.4	8.8	0.32
	101～120	矢倉川、不飲川、庄界川等	168	3.40	10.44	2.58	83.59	31.2	0.9	0.24
	121～	天川、林照寺川、波布谷川等	1739	3.12	12.44	1.94	82.50	336.2	6.6	0.11

汚濁物の流出挙動は晴天時と降雨時で大きく異なるため、シミュレーション結果を晴雨天時別の平均流出負荷量について降順にまとめて、表－7 に示す。晴天時流出負荷量については、一部で集水面積や人口・産業密度、山林からの基底流出分などの影響により傾向が不明瞭なところもあるものの、T-N・T-P とも、下水道整備によるドラスティックな流出負荷の削減効果が認められる。一方、降雨時流出負荷量については、こうした効果は顕著でなく、特にT-P では、下水道整備との関係が不明瞭になっている。表－8 は、晴雨天時別の比流出負荷量について降順に整理したものである。晴天時比流出負荷量については、T-N では下水道

表－7 流域からの晴雨天時別流出負荷量（負荷量について降順）

		順 位	河 川	合計集水面積 (km2)	土地利用 (％)				合計流域人口 (×千人)	平均下水道普及率 (％)	合計年平均流出負荷量 (ton/y)
					市街地	田	畑	山林			
晴	T-N	1～20	長命寺川, 字曾川, 大同川等	2236	3.22	12.83	1.68	82.27	441.0	7.4	2402.9
		21～40	草津川, 大川, 白鳥川等	404	12.18	26.01	4.17	57.64	272.2	35.8	597.6
		41～60	林照寺川, 伊佐々川等	304	13.28	36.83	3.79	46.09	174.8	21.8	339.2
		61～80	小田川, 法竜川, 今津川等	85	12.44	26.94	1.56	59.06	95.9	15.8	167.4
		81～100	相模川, 柳川, 野瀬川等	52	15.11	36.04	4.64	44.20	65.7	25.5	82.0
		101～120	家棟川, 木戸川, 大川等	36	20.25	49.77	1.13	28.86	53.3	53.8	38.3
		121～	南川, 北川, 真光寺川等	15	23.44	56.13	5.19	15.25	21.4	78.8	8.1
	T-P	1～20	長命寺川, 字曾川, 大同川等	2024	5.05	15.79	2.13	77.03	649.6	18.6	76.7
		21～40	伊佐々川, 平田川, 兼山川等	528	5.90	17.41	1.65	75.03	223.1	18.4	29.4
		41～60	芹川, 法竜川, 犬上川等	322	10.88	31.51	3.93	53.69	111.3	13.9	15.9
		61～80	今川, 和爾川, 大宮川等	138	6.23	17.63	1.82	74.32	56.7	25.0	9.2
		81～100	びわだ川, 四ッ谷川等	75	9.50	26.22	3.38	60.90	34.1	38.6	4.7
		101～120	神奈川, 新保川, 八屋戸川等	32	12.37	34.45	2.71	50.47	22.0	63.8	1.8
降	T-N	1～20	長命寺川, 字曾川, 田川等	1814	5.77	20.79	2.44	71.00	525.7	9.7	4671.5
		21～40	愛知川, 白鳥川, 安曇川等	888	3.50	11.55	1.64	83.31	179.2	10.1	1601.4
		41～60	田井川, 境川, 伊佐々川等	210	14.07	21.79	3.64	60.50	200.2	47.5	840.2
		61～80	百瀬川, 狼川, 和田内川等	108	10.15	24.00	2.66	63.19	81.3	19.6	492.5
		81～100	大坪川, 大惣川, 天神川等	51	12.79	31.79	2.27	53.16	50.6	25.7	247.0
		101～120	平田川, 大川, 大宮川等	47	10.09	8.46	0.94	80.51	52.5	35.9	105.0
		121～	家棟川, 木戸川, 相模川等	15	23.58	4.15	0.00	72.27	34.8	95.9	12.4
	T-P	1～20	家棟川, 伊佐々川等	1580	7.27	21.78	1.98	68.97	631.8	24.4	510.1
		21～40	鴨川, 山賀川, 天神川等	988	3.77	13.20	2.61	80.42	208.7	21.1	181.8
		41～60	知内川, 川道川, 文祿川等	281	6.47	17.69	2.13	73.72	111.5	12.4	86.0
		61～80	矢倉川, 不飲川, 境川等	163	4.11	14.07	3.63	78.19	59.0	14.8	49.3
		81～100	十一川, 岩熊川, びわだ川等	57	14.57	29.06	1.79	54.58	77.1	11.1	28.0
		101～120	小田川, 柳川, 波布谷川等	49	7.61	15.38	0.12	76.89	26.5	41.8	15.5
時	T-P	121～	常世川, 比良川, 深町川等	15	13.40	5.89	5.05	75.66	9.8	54.5	3.1

表－8 流域からの晴雨天時別比流出負荷量（比負荷量について降順）

		順 位	河 川	合計集水面積 (km2)	土 地 利 用 (%)				合計流 域人口 (×千人)	平均下水 道普及率 (%)	年平均 比流出負荷量 (ton/km2・y)
					市街地	田	畑	山林			
晴	T-N	1～20	平田川、野瀬川、米川等	107	3.11	5.26	0.19	91.45	75.2	3.5	2.66
		21～40	大宮川、林照寺川、今川等	446	3.46	8.93	0.76	86.85	129.5	10.3	2.34
		41～60	生来川、北川、境川等	187	4.39	17.56	1.98	76.06	52.4	26.7	2.04
		61～80	和田内川、大川、高橋川等	146	8.24	30.05	5.99	55.71	111.3	24.7	1.57
		81～100	石田川、伯母川、伊佐々川等	981	6.63	15.30	1.59	76.47	360.4	31.0	1.13
		101～120	生川、神奈川、常世川等	561	7.70	20.55	3.95	67.80	183.4	29.9	0.61
		121～	金丸川、山賀川、真光寺川等	704	6.20	26.20	2.41	65.19	212.3	10.1	0.34
	T-P	1～20	平田川、野瀬川、伊佐々川等	105	28.69	37.50	4.71	29.10	295.9	32.0	0.25
		21～40	山寺川、北川、法竜川等	99	14.09	31.22	2.90	51.79	97.4	26.9	0.11
		41～60	兼山川、大正寺川、矢倉川等	409	5.99	19.98	1.92	72.11	185.6	16.4	0.07
		61～80	比良川、大堂川、家棟川等	301	7.57	18.54	1.45	72.44	80.1	33.1	0.06
		81～100	鶴川、鴨川、大川等	199	3.29	15.96	3.24	77.51	18.3	10.3	0.05
		101～120	芹川、吾妻川、天野川等	756	5.57	15.63	1.63	77.17	182.1	21.1	0.03
降	T-N	1～20	大上川、石田川、知内川等	1264	4.03	16.97	2.54	76.46	264.9	10.3	0.01
		21～40	金丸川、薬師堂川、米川等	91	15.56	64.70	4.68	15.06	84.8	0.5	11.35
		41～60	八屋戸川、野瀬川、青井川等	170	15.05	40.46	6.82	37.66	147.0	8.9	7.07
		61～80	田川、野離子川、守山川等	290	11.81	30.93	2.97	54.29	137.7	27.9	4.72
		81～100	余呉川、田井川、伊佐々川等	481	5.46	18.76	1.34	74.44	175.7	22.0	3.15
		101～120	矢倉川、今川、鴨川等	405	6.04	14.27	1.53	78.16	112.4	15.1	2.40
		121～	比良川、家棟川、御呂戸川等	774	4.29	9.93	2.32	83.47	238.9	38.8	1.54
	T-P	1～20	日野川、石田川、柳川等	922	3.59	14.11	1.72	80.58	227.9	19.8	0.75
		21～40	丹出川、高橋川、伊佐々川等	158	28.62	41.69	2.71	26.98	283.3	59.0	1.58
		41～60	法竜川、鯉川、御呂戸川等	123	14.16	50.97	5.48	29.39	156.1	12.3	0.87
		61～80	大正寺川、文禄川、雄琴川等	174	13.41	37.01	3.67	45.91	87.9	12.7	0.58
		81～100	土川、大浦川、大堂川等	529	5.44	17.78	1.23	75.55	131.9	9.2	0.26
		101～120	境川、不飲川、矢倉川等	171	3.38	9.55	2.86	84.21	30.9	0.9	0.18
時	T-N	121～	家棟川、天川、比良川等	1726	3.14	12.51	1.96	82.39	337.1	6.6	0.08

普及率の小さい山地河川， T-P では都市河川が、それぞれ上位に位置しており、汚濁発生源が異なることによる特性の違いが明瞭である。降雨時比流出負荷量については、表－6 で見られたのと同じ傾向が認められ、年間流出特性がこうした降雨時流出によってかなり支配されていることが分かる。

4.2 降雨時流出を考慮した汚濁物流出特性の評価

流域からの流出汚濁負荷量は降水量によって大きく変動するため、各カテゴリーからの流出負荷量を降水規模別にまとめて表－9 に示した。30mm/d 以上の大きな降水は年間15日しかないものの、その間の比流出負荷量は年間値の39.6～75.9%を占めており、汚濁物流出の集中性が示されている。この傾向は、小さな降雨でも一定の流出量があり比較的流出しやすいと考えられる T-N よりも、T-P で強く、また T-N 比流出負荷量では各カテゴリー間の差がほとんどないのに対して、T-P では南湖における比流出負荷量が北湖の4～5倍の大きさになっていることから、琵琶湖への T-P 流出量が時間的・地域的に著しく偏っていることがわかる。各降水量区分における平均日比流出負荷量（kg/km²・d）については、カテゴリー毎に降水量によって、T-N で最大90～318倍， T-P で最大531～1603倍の差があり、汚濁物流出の降水量依存性と大降雨集中性が非常に顕著であることが示されている。

図－4（1），（2）は、月別の T-N， T-P 比流出負荷量とその流出源比率を示したものである。T-N では、北湖における流出負荷量のほとんどが非市街地からの流出分であり、月降水量の大小に応じて、晴天時自然系負荷（非市街地）や降雨時ノンポイント負荷（非市街地）の比率が、月別比流出負荷量の中で大きなウエイトを占めている。北湖に比べて、南湖では晴天時・降雨時のポイント負荷や降雨時ノンポイント負荷（市街地）の比率が大きく、特に南湖東岸では、降水量の少ない月には、晴天時ポイント負荷が流出比負荷量の最大18.9%を占めるに至っている。一方 T-P では、降雨が集中する梅雨期や秋雨期において、表－9 で見られた流出負荷量の南北較差が顕著に現れている。流域の都市化や下水道の整備が進んでいる南湖では、北湖に比べて、ポイントソースからの晴天時流出成分が少ない一方で、市街地ノンポイント負荷をはじめとするノンポイントソースからの降雨時流出成分が大きなウエイトを占めている。特に梅雨期や秋雨期には南湖流出負荷量の90%以上が降雨時流出成分となっていることから、今後琵琶湖の富栄養化防止のためには、南湖へのこうした降雨時流出負荷量を如何に効率よく制御するかが、重要な課題であると考えられる。

5. おわりに

本研究では、琵琶湖流入河川を対象としたマクロモデルによるシミュレーション解析を行い、琵琶湖への汚濁物流出特性を巨視的に検討する手法を提案した。その結果、集水域からの晴天時・降雨時別の流出負荷量・流出

表－9 降水規模別年間比流出負荷量

区分	降水量 (mm/d)	日数 (d)	T-N		T-P	
			比流出負荷量		比流出負荷量	
			(kg/km ²)	(kg/km ² ・d)	(kg/km ²)	(kg/km ² ・d)
北湖東岸	0～0.5	242	713 (21.2)	2.9	27 (11.1)	0.11
	0.5～10	75	323 (9.6)	4.3	15 (6.2)	0.20
	10～30	33	596 (17.7)	18.0	41 (16.7)	1.25
	30～100	14	1182 (35.1)	86.3	105 (42.4)	7.66
	100～	1	552 (16.4)	551.7	58 (23.6)	58.42
	合計	365	3366 (100.0)	9.2	246 (100.0)	0.68
北湖西岸	0～0.5	242	905 (21.7)	3.7	23 (10.1)	0.10
	0.5～10	75	399 (9.6)	5.3	14 (5.9)	0.18
	10～30	33	712 (17.1)	21.5	39 (16.7)	1.17
	30～100	14	1456 (35.0)	106.3	99 (42.7)	7.21
	100～	1	694 (16.7)	693.8	57 (24.5)	56.69
	合計	365	4166 (100.0)	11.4	232 (100.0)	0.63
南湖東岸	0～0.5	242	711 (13.5)	2.9	62 (5.3)	0.26
	0.5～10	75	439 (8.3)	5.8	46 (3.9)	0.62
	10～30	33	1077 (20.5)	32.5	174 (14.8)	5.25
	30～100	14	2118 (40.2)	154.6	531 (45.3)	38.79
	100～	1	921 (17.5)	921.2	359 (30.6)	359.20
	合計	365	5266 (100.0)	14.4	1172 (100.0)	3.21
南湖西岸	0～0.5	242	1323 (31.3)	5.5	47 (4.8)	0.19
	0.5～10	75	529 (12.5)	7.0	44 (4.6)	0.59
	10～30	33	702 (16.6)	21.2	148 (15.2)	4.46
	30～100	14	1179 (27.9)	86.0	428 (44.0)	31.22
	100～	1	493 (11.7)	493.2	305 (31.4)	304.60
	合計	365	4226 (100.0)	11.6	972 (100.0)	2.66
全域	0～0.5	242	771 (21.2)	3.2	29 (9.6)	0.12
	0.5～10	75	342 (9.4)	4.5	17 (5.5)	0.22
	10～30	33	644 (17.7)	19.5	49 (16.2)	1.49
	30～100	14	1286 (35.3)	93.9	131 (43.1)	9.58
	100～	1	599 (16.4)	598.9	78 (25.6)	77.91
	合計	365	3642 (100.0)	10.0	304 (100.0)	0.83

（ ）内：区分毎の合計に占める各比流出負荷量の割合（％）

比負荷量の算定、および流域特性や降水規模、流出源と流出量の関係を検討する枠組みが示された。しかし、個別の流域についての精緻な議論を行うには至らないため、今後は、さらに詳細な検討が行えるようモデルの構造を改良するとともに、シミュレーション解析を進め、琵琶湖集水域における合理的な流域管理施策を検討していきたいと考えている。

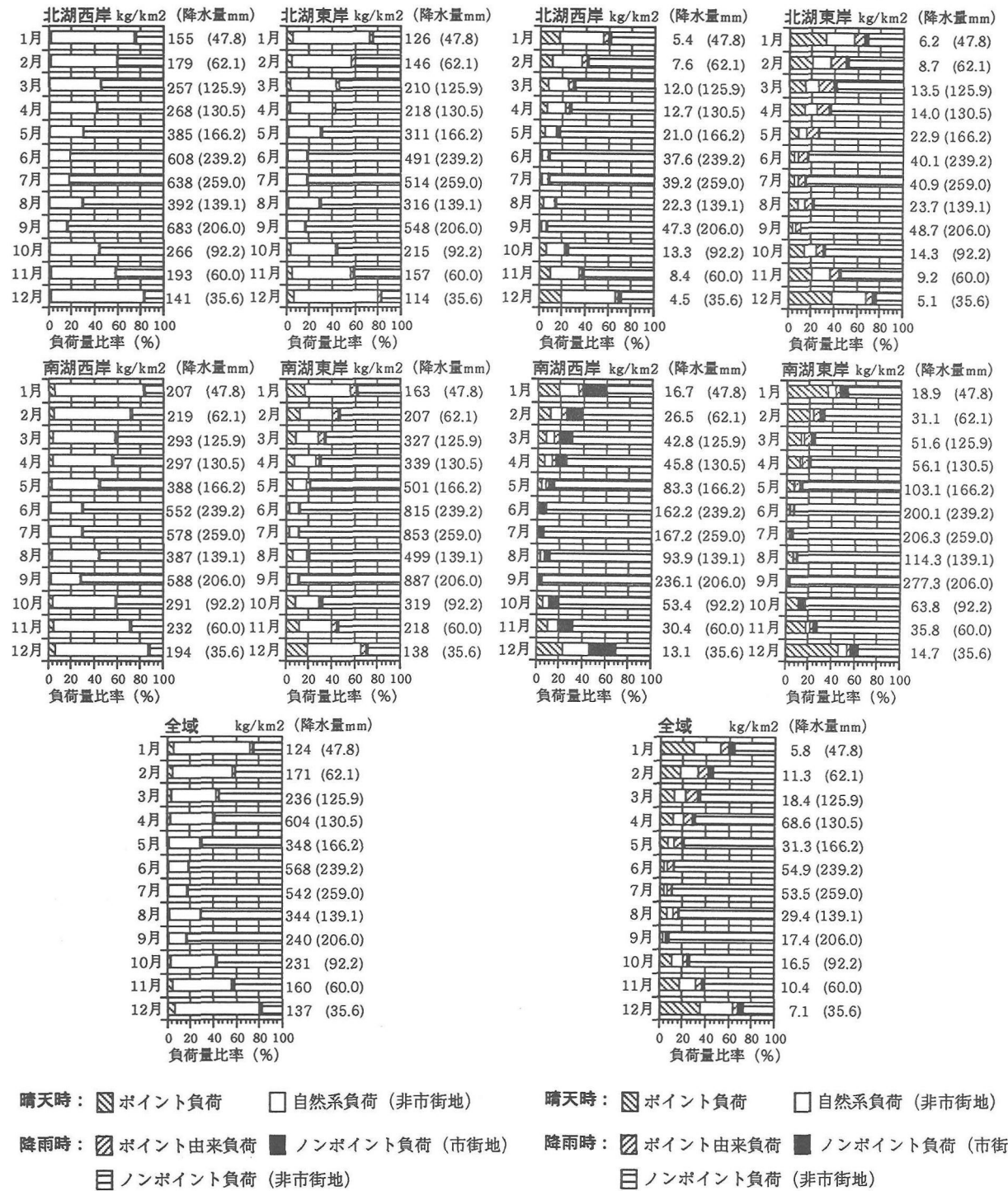


図-4 (1) 月別比流出負荷量とその流出源比率 (T-N) 図-4 (2) 月別比流出負荷量とその流出源比率 (T-N)

なお、本研究は、平成3～5年度滋賀県琵琶湖研究所委託研究「都市域の非特定汚濁負荷削減に関する研究」（研究代表者：山田淳）、および文部省科学研究費補助金・奨励研究(A)（課題番号：07750645，研究代表者：市木敦之）による成果の一部である。また、本論文をまとめるにあたり、滋賀県琵琶湖研究所の中村正久所長にご指導を賜ったことを記し謝意を表する。

<参考文献>

- 1) たとえば國松孝男，須戸幹(1996) 林地からの水質汚濁物質流出の評価について，第30回日本水環境学会年会講演集，pp. 508
- 2) たとえば市木敦之，山田淳(1993) 粒度特性を考慮した非特定汚濁物の流出管理に関する研究－雨水滯水池を例として－，環境システム研究，Vol. 21，pp. 436-444
- 3) 國松孝男(1986) 河川による物質輸送，琵琶湖集水域の現状と湖水への物質移動に関する総合研究，1982-1984年度，琵琶湖研究所プロジェクト研究記録集，No. 85，A2
- 4) 國松孝男，村岡浩爾編(1989) 河川汚濁のモデル解析，技法堂出版
- 5) 原稔明，西嶋孝治，加藤正典(1995) 琵琶湖の水環境モニタリングと湖水位変動，環境システム研究，Vol. 23，pp. 632-637
- 6) 市木敦之，大西敏之，山田淳(1996) 集水域における下水道整備進捗にともなう琵琶湖流入汚濁負荷量の変化，水環境学会誌，Vol. 19，No. 2，pp. 109-120
- 7) 杉本博之，鈴木研司，小山勝久(1995) 琵琶湖・淀川水質浄化共同実験センターについて，環境システム研究，Vol. 23，pp. 605-609
- 8) 滋賀県琵琶湖研究所(1986) 滋賀県地域環境アトラス
- 9) 市木敦之，山田淳，大西敏之(1994) 流域特性を考慮した汚濁物流出プロファイルの予測，環境システム研究，Vol. 22，pp. 68-77
- 10) 市木敦之，大西敏之，山田淳(1995) 水環境における市街地ノンポイントソースの定量評価－栄養塩に関するシミュレーション解析－，環境システム研究，Vol. 23，pp. 12-19
- 11) 市木敦之，山田淳，辰巳直，阿部野剛(1996) 都市域中小河川における降雨時汚濁物流出モニタリング調査，土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集，pp. II -146-1- II -146-2