

非特定汚染源の流出特性と単位面積流出負荷モデル

関西大学工学部土木工学教室 正員○和田安彦

関西大学工学部土木工学教室 学員 鳥原寛二

1. 緒言

情報化社会への急速な移行の中で、都市への人口、産業、情報の集積化が次々と行われ、都市域に面的に発生する負荷量は非常に多くなり、降雨時に流出する負荷量は無視しえない量となっている。これらの問題に効果的に対処し、公共用水域を管理してゆくためには、各種の諸計画や設計においてこれらの負荷量を定量するモデルが必要となる。

当論文では、分流式雨水管や合流式下水道において雨天時に流出してくる負荷量を定量し、それをもとにして主な都市の排水区において流出負荷量を算定するモデルを作成し、その適合度と地域的な特徴等について検討した。

2. 雨天時水質に影響する要因と流出負荷量

(1) 雨天時水質に影響する要因

雨天時合流式下水道の水質、負荷量に影響する要因には大別すると次のようなものがある。⁶⁾

- 1) 対象とする地域因子
- 2) 水文因子
- 3) 都市流出系と代謝
- 4) 物質の供給と存在ポテンシャル
- 5) 対象時間
- 6) 維持管理

表-1 は、関連する項目や因子を表わしたもので、対象地域因子は、流域の地形や評価位置における諸特性を表わし、水文因子は降雨やその流出にかかるものである。都市流出系と代謝は地表面及び管きよ系を含めた流れ系とその中を流れる場合の物質の状態、及び内部変化を代謝系として表わすものである。また、晴天時汚水と流出雨水量との割合も流出負荷には関連をもってくる。物質の供給と存在ポテンシャルは常に流れている晴天時負荷及び、管きよ系の管底や周辺地域に堆積している負荷と雨天時に路面や大気、土壌等から流出してくる周辺非点源負荷も含まれ、維持管理の程度も影響してくる。雨天時下水水質は対象時間も大きな要因となり、特に晴天時の負荷の発生とも関係する。地域環境には人間の動きや活動を中心とした総合的な負荷発生レベルが存在する。

さらに具体的な主要項目をあげると次のようになる。

- 1) 晴天時負荷量及び汚水量
- 2) 降雨量及び流出雨水量
(流出率の含むもの)、ピーク流量

表-1 雨天時水質、流出負荷の支配要因

因子	特性	支配要因			
対象地域	流域の諸特性	対象流域面積 対象地点 地形勾配			
水文因子	降 雨	降雨量、降雨強度、降雨継続時間、降雨断続度、 降雨パターン、先行晴天日数			
	流 出	流出率			
都市流出系と代謝	流れ系	地表面流出	水の移動	流出雨水量、ピーク流量、 掃流、沈降、生物体の移動、 ポンプ運転の方法	
		管きよ系			配置特性
	代謝反応系	生物反応、バクテリアによる分解			
	晴天時汚水と流出雨水量との割合				
物質の供給と存在ポテンシャル	晴天時負荷	生活負荷、工場負荷			
	管きよ系堆積負荷	先行晴天日数、堆積状況			
	雨天時流入負荷	周辺非点源負荷	降雨負荷、路面負荷、屋根負荷、土壌流出負荷、 雨水、汚水マス負荷、中小河川床堆積負荷		
	維持管理の程度				
対時間	降雨発生、継続時間	降雨発生時間、継続時間			
地域環境	自然環境				
	社会環境	土地利用、交通量、生活レベル、環境管理レベル			

- 3) 晴天時汚水量と流出雨水量の割合
 - 4) 管きよ系の配置勾配等他
 - 5) 地域及び管きよ系の堆積負荷量
 - 6) 降雨流出時間(昼間、夜間)
 - 7) 対象地点及び流域の大小
 - 8) 降雨強度(パターン)及び継続時間
 - 9) 先行晴天日数
 - 10) 都市活動に伴う周辺非点源負荷
 - 11) 維持管理の程度
- (2) 雨天時水質

表-2 雨天時下水の水質

項目	範囲 (mg/l)	平均 (mg/l)
BOD	6.45~267.23	119.67
COD	12.43~181.34	74.26
SS	88.13~394.97	209.91

表-3 晴天時下水の水質

項目	範囲 (mg/l)	平均 (mg/l)
BOD	50.0~195.9	112.8
COD	29.9~135.8	58.9
SS	41.1~175.2	84.6

注1) 範囲は、都市の平均値の最大及び最小である。
 2) 平均は、全調査都市11都市の水質の都市別平均値の平均である。

全国主要11都市の合流式下水道の雨天時下水の水質は、表-2 (晴天時下水水質は表-3) のようになっている。⁵⁾ 雨天時下水水質も決して低い濃度ではない。雨天時下水の非超過確立50%の濃度はBOD90ppm、COD54ppm、SS137ppmであり、非超過確率70%での濃度はそれぞれ121ppm、71ppm、215ppmである。

表-4 は分流式雨水管の水質の一例を表わしたものである。住商混合地域の古くからある市街地の花隈では、雨天時水質は比較的高く、BODは平均値で35.9ppmであり、溶解性物質も多く、BODが17.5ppmであるが全体の2/3は無機性物質である。

表-4 分流雨水管の平均水質 (ppm)

場所 項目	花隈		北須磨	
	範囲	平均	範囲	平均
BOD	17.0 ~ 67.7	35.9	5.26 ~ 49.4	13.8
S-BOD	7.86 ~ 30.7	17.5	—	—
COD	16.8 ~ 64.4	34.0	10.9 ~ 40.3	17.0
SS	73.1 ~ 221.0	152.0	48.2 ~ 88.8	67.0
V-SS	19.6 ~ 114.0	58.3	9.84 ~ 29.0	16.4
T-P	0.27 ~ 0.54	0.41	0.24 ~ 0.6	0.32
K-N	2.08 ~ 7.97	5.42	1.31 ~ 2.8	1.71

一方、新しく造成された北須磨団地は住居専用地域が大半で、雨水管流出水質の平均値もBODで13.8ppm、COD17.0ppmと比較的低くなっており、花隈地区の1/2~1/3の濃度となっている。SSは67ppmと比較的高く、有機性のもは16ppmであり、3/4は無機性のもとなっている。

(3) 単位面積、単位降雨の流出負荷量

雨天時の負荷量を求め、有効降雨量(mm)の数値を用いて単位面積および単位流出降雨量当たりの雨天時流出負荷量を求めた結果は、第5表のようにあらわされる。BODでみると、150haの排水区に10mmの降雨が生じ、平均流出率が0.6で有効降雨が6mmの場合の平均降雨時流出負荷量は、0.808t/降雨(0.898×6.0×1/1,000)となる。排水面積、有効降雨量によって、雨天時流出負荷量は変化する。

表-5 単位面積及び単位流出降雨量当たり雨天時流出負荷量

項目	雨天時流出負荷量 (kg/ha-mm)
BOD	0.898
COD	0.553
SS	1.897

注) 昭和50~52年の平均を示す。雨天時流出負荷量には晴天時流出負荷量を含む。

(4) 雨水時単位面積流出負荷量
 雨天時流出負荷量は各都市の負荷発生量、降雨量、降雨流出量、先行晴天日数、堆積量、都市管きよ配置等の条件によって変化するため、対象とする都市によって実測調査をもとにして算定する必要がある。しかし、平均的に考えた場合にはどのような流出になるかをマクロに把握することも必要となる。全国の主要合流式下水道の雨天時下水調査資料を

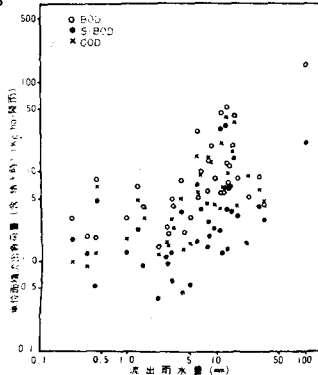


図-1 流出雨水量と単位面積流出負荷量

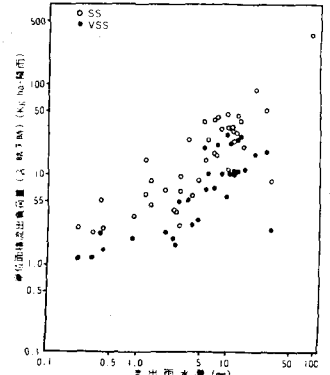


図-2 流出雨水量と単位面積流出負荷量

もとに、単位市街地排水面積において、1降雨において平均降雨量当たりの流出負荷量を求めると第1、2図のようになる。各都市、各降雨によって単位面積当たりの流出負荷量にばらつきがみられる。

これらをBOD、COD、SSについて、マクロに關係式に表わすと単位面積（1降雨）当たりの流出負荷量 y （ kg/ha ：降雨）は次のようになる。

$$BOD : y = 5.035 e^{0.04145} \quad (1)$$

$$COD : y = 2.903 e^{0.06832} \quad (2)$$

$$SS : y = 10.907 e^{0.04120} \quad (3)$$

ここで、 x ：流出雨水量（流出率のかかったもの mm）

3. 降雨流出に影響する変数とモデル

(1) 独立変数とパラメータ

降雨による汚濁流出に影響する独立変数とパラメータはThomas, Donaldらによると表-6に示すようなパラメータをあげている。変数には、降雨発生にかかわる事象と降雨事象をもとに強さ、積分流出量等を表わしたフラックスにか

表-6 降雨汚濁流出に影響するパラメータ

変数		パラメータ
総降雨事象	同時に起こるフラックス	
最後の降雨からの時間 (晴天日数)	流出強度	土地利用
路面清掃回数	累積流出量	地域(面積)
総流出量	降雨時間	不透透地域の割合(%)
降雨継続時間	降雨強度	地表面流出長
総降雨量	累積降雨量	道路公園地域の割合(%)
平均降雨量		単位地域内の道路長
平均流出量		人口密度
		単位地域内の降下物の割合
		単位地域内の排水区数
		気象データ

(2) 流出負荷モデル

降雨による流出負荷の基本的な回帰モデルは表-7に示すような5つのパターンに分類しうる。最も単純で数多く用いられるのは一次元線型モデルであり、支配変数が数多くある場合には多変量線型モデルが用いられる。

一方、水質指標や各種変量を対数変換した変量で線型表示した片対数変換モデルがあり、各変数の積で表わした両対数変換モデル、変形の非線型モデル等もある。

表-7 回帰モデル

レベル (1)	回帰モデル (2)	一般型 (3)
1	一次元線型	$P = A + Bx$
2	多変量線型	$P = A + \sum_{i=1}^n B_i X_i$
3	片対数変換	$P = A + \sum_{i=1}^n B_i \ln(X_i)$
4	両対数変数	$P = A \cdot \prod_{i=1}^n B_i X_i$
5	非線型	$P = X_i$ の非線型関数 $i=1, 2, \dots, n$

注釈 X_i = 独立変数 A, B_i = 回帰係数
 P = 汚濁フラックス測定値

4. 分流式雨水管単位面積負荷流出モデル

(1) 対象地域

対象地域はデータのある都市排水区の分流式雨水管の4排水区であり、その流域特性は表-8のようになっている。

表-8 試験排水区の特異性(分流式下水道)

(2) 雨水管単位面積負荷流出モデル

分流式雨水管の単位面積流出負荷の状況を各都市の排水区の基礎データを用いてモデル化したものが、表-9である。

排水区名	面積 (ha)	人口密度 (人/ha)		工種別(土地利用)面積* (ha)				不透透 面積率	平均こう配(%)	
		昼間	夜間	a	b	c	d		地盤	管路
C	13.69	109.5	79.6	5.6	1.7	—	—	0.533	22.6	17.8
D	106.40	227.5	—	78.0	7.0	14.0	7.4	0.799	1.0	1.7
B	26.75	90.0	121.0	6.97	5.22	10.22	4.34	0.456	27.4	37.3
A	17.17	541.6	157.0	6.39	9.31	0.17	1.30	0.914	16.1	22.5

* a: 建物(屋根) c: 未舗装面、開地、運動場等
b: 舗装面、駐車場等 d: 公園、芝生、田畑、緑地等

この表から明らかな事項をとりまとめると、次のようになる。

- 1) 地域ごとに流出と発生負荷の特性があり、全地域をすべて含めた単一のモデル式で流出負荷を表

表-9 降雨モデル分析による1降雨当りの単位面積流出負荷量(分流式雨水管)(kg/ha)⁷⁾

項目	モデル 対象地域	データ 数	P=A・(総流出量) ^D ・(継続時間) ^D				P=A+B・(総流出量)+C・(継続時間)				P=A+B・ln(総流出量)+C・ln(継続時間)			
			A	B	C	重相関係数	A	B	C	重相関係数	A	B	C	重相関係数
BOD	A	10	0.631	0.544	-0.0495	0.66	0.261	0.278	-0.00108	0.67	0.559	0.169	0.00949	0.68
	B	10	5.95	0.744	-0.535	0.73	2.78	1.75	-0.355	0.34	4.79	1.62	-0.746	0.46
	C	4	1.35	0.497	-0.570	0.46	0.231	1.70	-0.0453	0.37	0.676	0.131	-0.0786	0.43
	D	7	0.796	0.941	-0.0166	0.92	0.200	0.618	0.00105	0.89	0.944	1.00	-0.0619	0.93
COD	A	10	1.35	0.756	-0.0682	0.91	0.201	1.06	-0.00782	0.98	1.39	0.590	-0.0393	0.89
	B	7	4.18	0.629	-0.384	0.84	2.09	1.40	-0.276	0.67	4.27	1.46	-1.11	0.80
	C	4	0.302	0.462	-0.798	0.72	0.0713	0.351	-0.0206	0.69	0.140	0.0217	-0.0391	0.74
	D	-												
SS	A	10	25.7	1.29	-0.387	0.98	-1.26	18.7	-0.266	0.98	19.2	9.67	-1.33	0.82
	B	10	74.5	1.11	-0.999	0.85	15.5	11.4	-1.87	0.50	32.6	11.3	-6.54	0.68
	C	4	80.0	1.25	-1.57	0.91	1.96	15.4	-0.872	0.86	4.90	0.924	-1.60	0.89
	D	7	17.2	1.56	-0.525	0.78	2.50	12.7	-0.567	0.65	26.9	27.0	-11.0	0.83
T-P	A	10	0.00514	0.387	0.468	0.85	0.00238	0.00396	0.000682	0.77	0.00641	0.00306	0.319	0.87
	B	10	0.0365	0.707	-0.107	0.87	0.0173	0.0223	-0.00256	0.70	0.0395	0.017	-0.00163	0.79
	C	4	0.000724	-0.110	0.927	0.99	0.000453	-0.00395	0.000848	0.99	0.000434	-0.0000939	0.00186	0.99
	D	-												
T-KN	A	10	0.161	0.796	-0.0774	0.98	0.0206	0.115	-0.000424	0.99	0.156	0.0666	-0.00473	0.93
	B	10	0.268	0.128	0.343	0.50	0.391	0.0793	-0.00434	0.19	0.367	0.0684	0.107	0.37
	C	4	0.00000140	-2.14	2.98	0.82	0.0126	-0.372	0.0139	0.91	-0.0653	-0.0235	0.0216	0.94
	D	-												

総流出量：流出流量/排水面積 (cm)
 降雨の降り始めから流出の終るまで
 継続時間：降雨の降り始めから流出の終るまでの時間 (hr)

わすことは困難である。そのため、各地域の排水区によって、流出負荷を表わすモデル式が必要となる。

2) ベキ乗で表わしたモデルは

$$P = A (\text{総流出量}) \cdot (\text{継続時間})$$

比較的回帰式の相関係数が大きく、合致度の良い項目は、COD, SS, T-P, T-KN等であり、BODも比較的良好である。

3) 一次式で表わしたモデルは

$$P = A + B [\text{総流出量}] + C [\text{継続時間}]$$

COD, SS, T-P, T-KN等は例外のあるものの合致度は良く、BODも比較的良好である。

4) 自然対数をとって表わした一次式のモデルは

$$P = A + B \cdot \ln [\text{総流出量}] + C \cdot \ln [\text{継続時間}]$$

対数をとらない場合よりも一般的に回帰式の相関係数は高く、モデルの合致度は比較的良好となる。

5) 排水区別にみると、一般的にみてA排水区の合致度が良く、BODを除く他の項目では、C排水区の合致度が非常に良い。これは両排水区の人口密度や非浸透面積の割合が、他の排水区と比べて比較的小さいことと関係があるのではないかと考えられる。

以上のことから、3つのモデルで雨水管単位面積流出負荷量を適切に表わすことができ、中でもベキ乗で表わしたモデルの適合度はすぐれており、雨天時の単位面積当りの流出負荷量は、総流出量、継続時間によって表わしうる。他の因子をもって表わすことも可能ではあるが、利用データの制約等にもよる。

5. 合流式下水道単位面積負荷流出モデル

(1) 対象地域

対象地域は自然排水区の5つの排水区であり、その流域特性は表-10のようになっている。^{3),4)}

(2) 自然排水区の雨天時合流式下水道負荷流出モデル

自然排水区の合流式雨天時流出データを用いて、単位面積当りの流出負荷量をモデル化したものが表-11である。合流式下水道の場合も分流式の場合と同様に、地域ごとに流出と発生負荷を表わすことは

表-10 試験排水区の特性 (合流式下水道自然排水区)

排水区名	土地利用*	面積 (ha)	人口 (人)		人口密度 (人/ha)	平均こう配(%)		不透透面積率	晴天時下水層 (mm/日)	晴天時時間 最大 下水量 (mm/時)
			昼間	夜間		地盤	管路			
E	R	22.09	3,580	4,270	295	20.00	17.58	0.39	12.4	0.85
G	C'	39.50	12,800	1,780	185	2.63	8.67	0.66	17.2	1.66
F	R, C'	68.37	36,268	8,358	341	9.00	1.70	0.73	21.4	1.48
H	R, PI	148.49	37,180	25,280	210	2.90	1.96	0.77	23.3	1.96
I	R	57.60	2,780	3,720	68	28.00	22.28	0.26	2.6	0.18

* R: 住居地域, C': 商業地域, PI: 準工業地域

表-11 合流式降雨モデル分析による1降雨流出当りの単位面積流出負荷量(kg/ha) (合流式自然排水区)

項目	対象地域	モデル	データ数	P=A・(総流出量) ^{0.5} ・(継続時間) ^{0.5}				P=A+B・(総流出量)+C・(継続時間)				P=A+B・ln(総流出量)+C・ln(継続時間)			
				A	B	C	重相関係数	A	B	C	重相関係数	A	B	C	重相関係数
BOD	E	13	1.54	0.291	0.595	0.89	-0.578	1.33	0.561	0.87	0.0173	1.40	2.99	0.78	
	F	12	2.28	0.160	0.615	0.84	1.38	0.381	0.914	0.79	2.50	0.824	2.49	0.78	
	G	10	8.89	0.730	-0.114	0.94	2.09	5.73	-0.0935	0.96	7.69	3.81	0.583	0.94	
	H	9	14.3	0.511	0.324	0.92	2.45	9.12	2.62	0.80	17.1	10.7	7.36	0.79	
	I	9	8.45	0.722	0.0136	0.70	1.65	12.1	-0.319	0.76	17.9	7.76	-3.23	0.72	
COD	E	13	2.94	0.723	0.292	0.96	-0.381	3.89	0.230	0.96	6.56	4.13	0.0515	0.92	
	F	12	2.04	0.432	0.224	0.77	1.80	0.530	0.150	0.54	3.50	1.16	-0.209	0.67	
	G	10	5.06	0.767	-0.0429	0.92	0.761	3.38	0.175	0.97	4.17	2.26	0.963	0.94	
	H	9	7.24	0.218	0.601	0.93	-1.33	4.24	3.03	0.86	2.63	2.09	12.2	0.78	
	I	9	5.32	0.480	-0.155	0.45	1.86	4.74	-0.189	0.69	8.36	2.85	-1.66	0.59	
SS	E	13	61.1	1.34	-0.452	0.97	4.23	41.9	-2.43	0.96	100	44.6	-31.2	0.92	
	F	12	7.18	0.758	0.0849	0.83	-1.67	5.25	1.34	0.81	13.4	8.25	-1.18	0.74	
	G	10	62.6	1.52	-0.904	0.92	5.46	32.3	-4.74	0.91	36.0	21.1	-8.75	0.88	
	H	9	23.8	1.59	-0.340	0.98	2.69	24.3	-1.98	0.91	52.0	35.2	-19.9	0.92	
	I	9	59.3	0.94	-0.396	0.63	6.77	53.7	-2.59	0.80	85.6	34.3	-22.7	0.72	
T-P	E	13	0.157	0.645	0.195	0.90	0.000833	0.135	0.0121	0.86	0.246	0.150	0.0181	0.83	
	F	12	0.101	0.0770	0.793	0.78	0.0790	0.00943	0.0579	0.70	0.0722	0.0142	0.199	0.70	
	G	9	0.147	0.786	-0.0822	0.96	0.0230	0.103	0.00135	0.97	0.123	0.0672	0.200	0.94	
	H	9	0.0657	0.603	0.699	0.94	0.00802	0.0771	0.0318	0.71	0.101	0.0665	0.116	0.74	
	I	9	0.0777	1.38	-0.472	0.68	0.0740	0.569	-0.0264	0.77	0.888	0.368	-0.223	0.72	
T-KN	E	13	0.241	0.265	0.670	0.95	-0.107	0.234	0.102	0.93	-0.0560	0.236	0.568	0.85	
	F	12	0.607	0.593	0.171	0.82	0.112	0.245	0.120	0.77	0.908	0.458	0.0574	0.77	
	G	9	0.416	0.415	0.737	0.94	-0.0315	0.428	0.182	0.98	0.321	0.238	0.678	0.97	
	H	9	0.622	0.543	0.545	0.98	-0.118	0.689	0.192	0.93	0.829	0.696	0.658	0.89	
	I	9	0.626	0.330	0.0946	0.63	0.411	0.447	0.00560	0.69	1.04	0.326	-0.107	0.74	

困難である。そのため、各地域の排水区によって流出負荷を表わすモデル式が必要となる。ただ、分流式下水道の場合に比べ合流式のデータは、測定時刻等により下水水量に大きな差があることを、十分考慮する必要がある。この表から明らかな事項をとりまとめると次のようになる。

1) 負荷量の推定モデル式の合致度は、べき乗の式、一次式、自然対数をとった一次式の順となっている。一方、F, I排水区の場合は、一次式、自然対数をとった一次式、べき乗の式の順となっている。これは、各流域の表面特性による差がでているものと考えられる。

2) べき乗の式、

$$P = A \cdot (\text{総流出量}) \cdot (\text{継続時間})$$

では、BOD, COD, SS, T-P, T-KNの各項目ともE, G, H排水区の合致度はきわめてよく、F排水区の合致度もよいものとなっている。しかしI排水区における合致度は、すべての項目にわたって、0.70以下とあまりよくない。これは、時刻により下水水量に変化が大きいという合流式下水道の特性によるものだと考えられる。

3) 一次式、

$$P = A + B \cdot (\text{総流出量}) + C \cdot (\text{継続時間})$$

では、平均してSSの合致度がよく、例外はあるものの、T-KN, CODの合致度も比較的よいものとなっている。

4) 自然対数をとった式

$$P = A + B \cdot \ln(\text{総流出量}) + C \cdot \ln(\text{継続時間})$$

では、各項目とも、地域によるばらつきがみられるが、平均してほぼ等しい。しかし、前2つのモデルに比べて、全般的に合致度は下回っている。

以上のことから、各流域によって流出の状態や発生負荷量に変化があるため、最も合致度の高い地域に合致したモデル式を選択する必要がある。また、合流式の自然排水区においても、べき乗のモデルは合致度が良好である。

6. 結言

分流式雨水管や合流式下水道において雨天時に流出してくる負荷量を定量し、それをもとにして主要都市の排水区において流出負荷量を算定するモデルを作成し、その適合度と地域的な特徴等について検討した。

降雨時流出負荷量に影響する要因を独立変数とパラメータに分け、流出負荷量を表わすモデルの基本型を明らかにした。分流式雨水管、合流式下水道における雨天時の単位面積流出負荷を表わすモデルを作成し、べきモデルが最も良好な適合度を示し、地域別に流出負荷量を総降雨流出量と降雨継続時間によって表わした。当モデルは今後の非特定汚染源負荷流出の算定に大いに資するものとなる。

参考文献

- 1) Thomas K. Jewell, Donald Dean Adrian; Development of Improved Storm water Quality Models, ASCE, Journal EE5, October 1981
- 2) 分流式下水道の雨水流出水に関するデータベース、土木研究所資料 第1549号、建設省土木研究所、昭和55年1月
- 3) 合流式下水道の雨天時下水に関するデータベース、その1、土木研究所資料、第1478号、建設省土木研究所、昭和54年1月
- 4) 合流式下水道の雨天時下水に関するデータベース、その2、土木研究所資料、第1544号、建設省土木研究所、昭和55年1月
- 5) 合流式下水道の雨水対策についての中間報告、合流式雨水対策調査専門委員会、下水道協会誌 vol. 17, No.191, 1980年4月
- 6) 和田安彦; 合流式下水道水質、水量変動特性とその解析、関西地区上下水道コンサルタント協議会、昭和53年9月
- 7) 和田安彦; 降雨流出による単位面積流出負荷モデル、水処理技術、vol.23, No.11, 1982年11月